



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Tecnologías de comunicación en tiempo real en entornos de automatización industrial. Análisis de la problemática y alternativas.

Francisco José Mosqueira Sáez

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Telemática

José López Vicario

Xavi Vilajosana Guillén

Enero 2020

Copyright © 2020 Francisco J. Mosqueira

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License"

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Tecnologías de comunicación en tiempo real en entornos de automatización industrial. Análisis de la problemática y alternativas.</i>
Nombre del autor:	<i>Francisco José Mosqueira Sáez</i>
Nombre del consultor/a:	<i>José López Vicario</i>
Nombre del PRA:	<i>Xavier Vilajosana Guillén</i>
Fecha de entrega (mm/aaaa):	01/2020
Titulación:	<i>Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Telemática</i>
Idioma del trabajo:	<i>Castellano</i>
Palabras clave	<i>Industria 4.0</i> <i>Automatización industrial</i> <i>TSN</i>
Resumen del Trabajo:	
<p>La automatización industrial se basa en el empleo de dispositivos capaces de controlar procesos en tiempo real, en base a la información proveniente de sensores conectados a sus entradas, y mediante la intervención consecuente sobre actuadores conectados a sus salidas. Este TFM examina la problemática asociada a la interconexión de este tipo de sistemas que trabajan en tiempo real, así como las diferentes alternativas y soluciones existentes en este sentido.</p> <p>En concreto, se realiza una descripción de diversos buses de campo y redes de Ethernet industrial, analizando cómo estas tecnologías resuelven la dificultad de garantizar la comunicación de manera fiable en tiempo real. Asimismo, se justifica la proliferación de redes de Ethernet industrial sobre buses de campo, en base a las ventajas ofrecidas por Ethernet en el contexto tecnológico actual.</p> <p>En este sentido, se está produciendo una transformación de la industria tradicional hacia la denominada Industria 4.0, caracterizada por la integración plena de las nuevas tecnologías de computación digital en los procesos físicos y de negocio. Este TFM investiga las repercusiones de esta transformación a nivel de conectividad, concluyendo la necesidad de adoptar estándares ampliamente reconocidos basados en Ethernet que cubran las carencias de esta tecnología, como los estándares TSN propuestos por el grupo de trabajo IEEE 802.1. Asimismo, se realiza una descripción de los estándares TSN desarrollados y en curso, analizando cómo estos estándares resuelven las</p>	

necesidades que Ethernet presenta no solo para sistemas de automatización industrial, sino para todo tipo de sistemas sensibles al tiempo en general.

Abstract:

Industrial automation is based on the use of devices capable of controlling processes in real time, based on information coming from sensors connected to their inputs, and by sending commands to actuators connected to their outputs. This TFM examines the problems associated with the interconnection of devices in real time automation systems, as well as the existing options and solutions in this regard.

Specifically, a description is made of various field buses and industrial Ethernet networks, analyzing how these technologies solve the difficulties associated with ensuring reliable communication in real time. Likewise, the proliferation of industrial Ethernet networks over field buses is justified in this TFM, based on the advantages offered by Ethernet in the current technological context.

In this sense, there is a transformation of the traditional industry towards the so-called Industry 4.0, characterized by the full integration of new digital computing technologies in physical and business processes. This TFM investigates the repercussions of this transformation at the connectivity level, concluding the need to adopt widely recognized standards based on Ethernet, but covering the shortcomings of this technology, such as the TSN standards proposed by the IEEE 802.1 working group. Likewise, a description is made of the TSN standards developed and in progress, examining how these standards solve the shortcomings that Ethernet presents not only for industrial automation systems, but for all types of time-sensitive systems in general.

Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Contexto y justificación del Trabajo	1
1.2	Objetivos del Trabajo	2
1.3	Enfoque y método seguido	3
1.4	Planificación del Trabajo	3
1.5	Breve resumen de productos obtenidos	5
1.6	Breve descripción de los otros capítulos de la memoria.....	5
2	Estado del Arte	6
3	Análisis de la problemática.....	7
3.1	Introducción	7
3.1.1	Automatización industrial.....	7
3.1.2	La Cuarta Revolución Industrial	7
3.2	Redes de automatización industrial	9
3.2.1	Introducción a las redes de automatización industrial.....	9
3.2.2	Retos de las redes de automatización industrial	11
3.2.3	Ethernet en redes de automatización industrial	12
3.2.4	La transición de las redes de la Industria 3.0 a la Industria 4.0... ..	15
3.3	Resumen y conclusiones	16
4	Protocolos de comunicación para redes de automatización industrial	17
4.1	Introducción	17
4.2	CIP	19
4.2.1	Protocolo de nivel de aplicación CIP.....	19
4.2.2	DeviceNet.....	21
4.2.3	ControlNet	23
4.2.4	CompoNet.....	25
4.2.5	EtherNet/IP.....	27
4.3	MODBUS	29
4.3.1	Protocolo de nivel de aplicación MODBUS	29
4.3.2	MODBUS Serie.....	30
4.3.3	MODBUS Plus	32
4.3.4	MODBUS/TCP	32
4.4	PROFIBUS	33
4.5	PROFINET.....	37
4.6	POWERLINK	40
4.7	EtherCAT	43
4.8	SERCOS.....	46
4.8.1	SERCOS I / II.....	47
4.8.2	SERCOS III	48
4.9	Resumen y conclusiones	49
5	Estándares del IEEE 802.1TSN	53
5.1	Introducción	53
5.1.1	Necesidad de las TSN.....	53
5.1.2	El IEEE 802.1 y el subgrupo de trabajo TSN.....	54
5.1.3	Designación de los estándares del IEEE 802.1	55
5.2	Visión general los estándares TSN	55
5.3	Funciones de sincronización.....	56
5.4	Funciones de control de latencia	57
5.4.1	Credit Based Shaper	57

5.4.2	Traffic-Aware Shaper.....	58
5.4.3	Frame Preemption.....	58
5.4.4	Cyclic Queueing and Forwarding.....	60
5.4.5	Asynchronous Traffic Shaping.....	60
5.5	Funciones de fiabilidad.....	61
5.6	Funciones de configuración y gestión.....	62
5.7	Perfiles TSN.....	64
5.8	Resumen y conclusiones.....	65
6	Conclusiones.....	69
6.1	Conclusiones generales.....	69
6.2	Trabajo futuro.....	70
7	Glosario.....	71
8	Bibliografía.....	73

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de Gantt final del TFM	4
Figura 2 Pirámide de Automatización Industrial [19].....	9
Figura 3 Tiempo mínimo de ciclo en función del número de dispositivos, con payload de 100 bytes y bitrates de 100 Mbps y 1 Gbps [29]	14
Figura 4 De la pirámide de automatización al pilar de automatización [30]	15
Figura 5 Clasificación de las redes industriales según niveles bajos [31].....	17
Figura 6 Cuota de mercado de redes industriales en 2019 [34].....	18
Figura 7 Arquitectura de protocolo CIP. Posibles implementaciones [37]	20
Figura 8 Representación física de bits en bus CAN [40]	22
Figura 9 Integración de CIP en una red Ethernet de uso general [46]	28
Figura 10 Arquitectura e implementaciones del protocolo MODBUS [32]	30
Figura 11 Esquema de funcionamiento de la subcapa MAC de FDL [59]	35
Figura 12 Sistema PROFIBUS jerárquico. Adaptado de [62]	36
Figura 13 Tiempo de ciclo típicos en los servicios PROFINET [65]	38
Figura 14 Arquitectura del protocolo PROFINET [64].....	38
Figura 15 Planificación temporal sincronizada en PROFINET [68].....	39
Figura 16 Arquitectura de la pila de protocolos POWERLINK [2].....	40
Figura 17 Fases de la comunicación en una red POWERLINK [69]	42
Figura 18 Integración de múltiples protocolos sobre EtherCAT [74]	45
Figura 19 Topología en anillo en una red SERCOS I/II [81]	47
Figura 20 Desempeño de una red SERCOS II a 16 Mbps [81]	48
Figura 21 Ejemplo de uso del medio con Time-Aware Shaper [30]	58
Figura 22 Arquitectura de la subcapa MAC Ethernet 802.3br [6]	59
Figura 23 Formatos de trama IEEE 802.3br [98]	59

Índice de tablas

Tabla 1 Revisión de objetivos	2
Tabla 2 Planificación de tareas por semanas.....	3
Tabla 3 Clasificación de protocolos basados en Ethernet [25]	14
Tabla 4 Longitud máxima del bus DeviceNet según el medio y bitrate [37].....	21
Tabla 5 Longitud máxima de bus ControlNet según el medio [41]	24
Tabla 6 Longitud máxima del bus CompoNet según el medio y bitrate [44]	26
Tabla 7 Longitud máxima del segmento PROFIBUS según el bitrate [57].	34
Tabla 8 Cuadro comparativo entre las redes industriales analizadas	52
Tabla 9 Cuadro resumen de estándares TSN del IEEE	68

1 Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

La automatización industrial se ha basado tradicionalmente en el empleo de autómatas o controladores lógicos programables capaces de controlar máquinas y procesos secuenciales en tiempo real. Estos dispositivos se basan en la lectura del estado de los sensores conectados a sus entradas para intervenir consecuentemente sobre los actuadores conectados a sus salidas.

La interconexión entre los dispositivos controladores y los dispositivos de campo (sensores y actuadores) vino haciéndose desde finales del siglo pasado mediante sistemas de comunicaciones específicos denominados buses de campo. Dichos buses de campo están diseñados para garantizar la distribución de valores de variables y órdenes o comandos en tiempo real entre estos dispositivos.

La necesidad de redes capaces de soportar la interconexión de un número de dispositivos cada vez mayor y con tasas de transferencia cada vez más alta dio lugar a los sistemas de Ethernet Industrial, capaces de aunar las ventajas de las omnipresentes redes Ethernet con los estrictos requisitos de las redes de automatización industrial.

Actualmente nos encontramos plenamente inmersos en una nueva Revolución Industrial o Industria 4.0 caracterizada por la integración plena de la computación digital en los procesos físicos, en lo que se viene denominando sistemas *ciberfísicos*.

Esta integración no será completamente posible sin sistemas de comunicaciones estandarizados, robustos, seguros, rápidos, y capaces de soportar la integración masiva de dispositivos de todo tipo y a todos los niveles de la industria, desde los procesos industriales hasta los sistemas de negocio. El grupo de trabajo IEEE 802.1TSN se encuentra actualmente inmerso en un conjunto de estándares de comunicaciones que cubran precisamente estos aspectos.

Este Trabajo de Fin de Máster (TFM) analiza los principales retos a los que las tecnologías de telecomunicación deben hacer frente en entornos industriales en tiempo real y las principales alternativas existentes que hasta ahora se han venido empleando. Asimismo, se exponen los retos a los que las tecnologías de telecomunicación deberán hacer frente en la nueva Industria 4.0, y se realiza un análisis técnico de las propuestas de estandarización que en este sentido están surgiendo del grupo de trabajo 802.1TSN.

1.2 Objetivos del Trabajo

El objetivo principal de este TFM es analizar los retos que la Industria 4.0 plantea a nivel de comunicaciones en entornos sensibles al tiempo, evaluando técnicamente las propuestas de estandarización y las principales alternativas existentes actualmente, haciendo hincapié en el concepto de TSN.

En este sentido, se definieron una serie de objetivos operativos, cuyo estado de consecución muestra en la Tabla 1.

Id	Objetivo	Resultado
O-1	Analizar la problemática existente a nivel de comunicaciones en entornos sensibles al tiempo, que hacen preciso el empleo de redes específicas para este cometido.	Se considera que este objetivo ha sido alcanzado y plasmado en el Capítulo 3 Análisis de la problemática.
O-2	Evaluar el empleo de diversas tecnologías de comunicación existentes en entornos de automatización industrial sensibles al tiempo.	Se considera que este objetivo ha sido alcanzado y plasmado en el Capítulo 4 Protocolos de comunicación para redes de automatización industrial.
O-3	Realizar un estudio de las propuestas de estandarización finalizadas y en curso por parte del grupo de trabajo 802.1TSN.	Se considera que este objetivo ha sido alcanzado y plasmado en el Capítulo 5 Estándares del IEEE 802.1TSN.
O-4	Presentar una comparativa de las tecnologías estudiadas según su ancho de banda, latencia, retardo, mecanismos de calidad de servicio (QoS) y tolerancia a fallos.	Se considera que este objetivo ha sido alcanzado y plasmado en el Capítulo 4 Protocolos de comunicación para redes de automatización industrial, siguiendo un esquema similar para cada tecnología, de modo que es sencillo establecer paralelismos entre cada protocolo. Asimismo, el apartado incluye la Tabla 8, que presenta una comparativa con las características principales de cada tecnología. Por otro lado, en el Capítulo 5 Estándares del IEEE 802.1TSN se plantea también un paralelismo entre el desempeño de los conformadores de tráfico (apartado 5.4), con un apartado específico para tolerancia a fallos (apartado 5.5).

Tabla 1 Revisión de objetivos

1.3 Enfoque y método seguido

Este TFM se ha enfocado como un análisis del estado del arte en redes de automatización industrial dividido en tres grandes bloques.

En primer lugar, se plantea una introducción a las redes de automatización industrial, tratando de responder las preguntas “qué” y “por qué” de dichas redes, así como los retos a los que estas deben plantear soluciones, tanto desde el punto de vista de lo que tradicionalmente ha sido la automatización industrial como desde la transición hacia la Industria 4.0.

El segundo bloque analiza el “cómo” de las tecnologías de automatización industrial más empleadas actualmente, tratando de emplear una estructura similar en cada una de ellas: origen de la tecnología, niveles que implementa, análisis de dichos niveles, tamaño de las redes y tasas de transmisión soportadas, acceso al medio, seguridad y desempeño.

Del mismo modo, el tercer bloque presenta el “por qué” de las redes TSN y presenta el objetivo de los estándares finalizados y en curso, analizando el “cómo” de los mecanismos más significativos de estas redes.

Dado que la elaboración de la documentación de base de este TFM se ha apoyado totalmente en documentación existente, se concluye cada bloque con un resumen que aporta cierta perspectiva global a los múltiples aspectos analizados en cada uno de dichos bloques, así como ciertas conclusiones personales fruto del análisis realizado.

1.4 Planificación del Trabajo

El comienzo del TFM tuvo lugar el 18 de septiembre de 2019, estableciéndose como fecha de entrega de la memoria el día 7 de enero de 2020, y de la entrega de la presentación el día 12 de enero de 2020.

Se ha dedicado una media de 4 horas diarias de trabajo durante los días hábiles. Por motivos personales, se fueron perdiendo diversos días hábiles en los que no se dedicó tiempo al Trabajo, por lo que fue preciso realizar ajustes en la planificación temporal original para recuperar horas en días festivos y no tener que variar el alcance original del TFM. La planificación temporal definitiva se muestra en la Tabla 2 y Figura 1:

TAREA	SEMANAS	HORAS
T-1	Semana 1	16
T-2	Semana 2	20
T-3	Semanas 3 a 8	116
T-4	Semanas 9 a 13	56
T-4bis	Semanas 13 a 14	40
T-5	Semanas 15 a 16	36
T-6	Semana 17	16
TOTAL HORAS		300

Tabla 2 Planificación de tareas por semanas

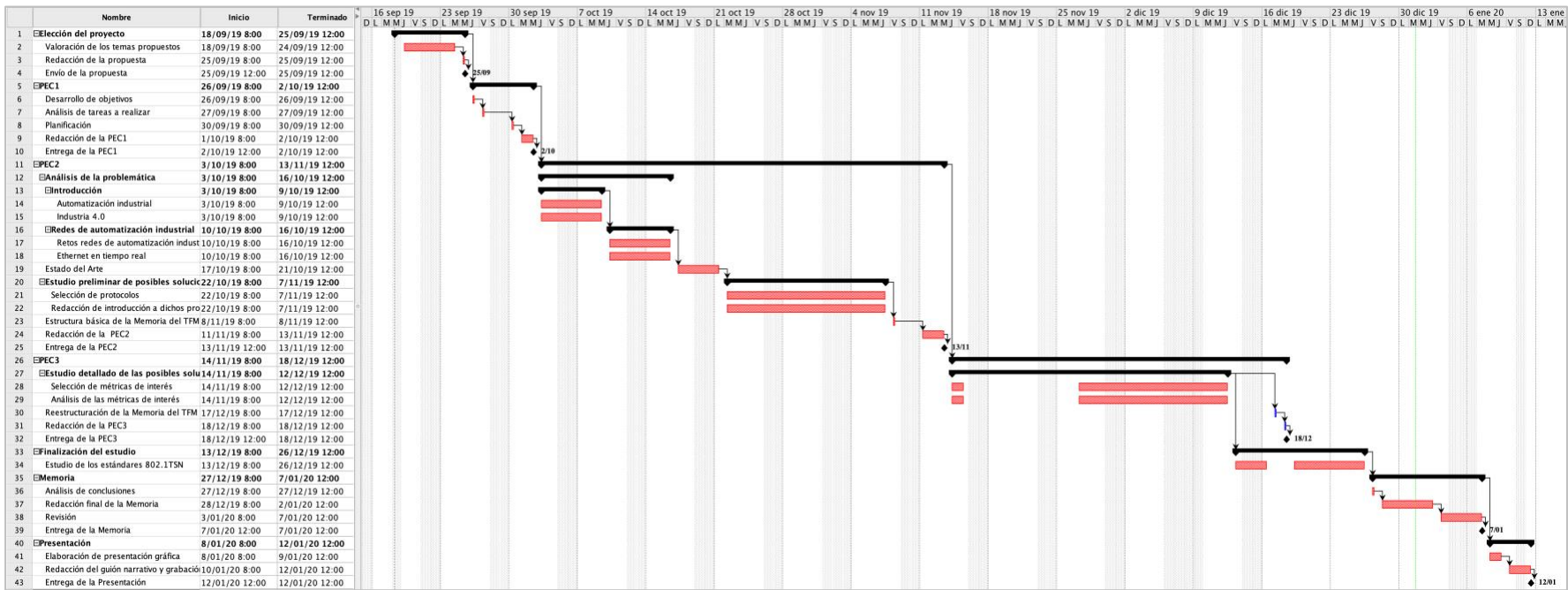


Figura 1 Diagrama de Gantt final del TFM

1.5 Breve resumen de productos obtenidos

El producto obtenido en este TFM es la presente Memoria, que comprende los siguientes subproductos:

- Análisis de la problemática existente a nivel de comunicaciones en entornos sensibles al tiempo, que hacen preciso el empleo de redes específicas para este cometido.
- Análisis de las tecnologías de automatización industrial más empleadas actualmente y comparativa de sus características principales.
- Descripción de los estándares TSN finalizados y en curso y análisis de sus objetivos.
- Conclusiones sobre la problemática y alternativas a nivel de comunicaciones en entornos de automatización industrial tradicional y en la Industria 4.0.

1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

La presente memoria consta de 5 capítulos con contenido técnico, que son los comprendidos entre el capítulo 2 y 6 incluidos.

En el Capítulo 2 Estado del Arte, se realiza un repaso de otros trabajos en los que se resuelvan o planteen objetivos coincidentes con los de este TFM. De este modo, se mencionan algunos trabajos relevantes que aportan una visión global a la automatización industrial tradicional y a la Industria 4.0, desde el punto de vista de las redes que la soportan, y las tecnologías orientadas a este uso.

La memoria continúa con el Capítulo 3 Análisis de la problemática, en el que se presenta el concepto de automatización industrial, el modelo tradicional de pirámide de automatización y los retos que presentan las redes de automatización industrial, especialmente en el contexto de cambio de paradigma hacia la Industria 4.0.

En el Capítulo 4 Protocolos de comunicación para redes de automatización industrial, se realiza un estudio de diversas tecnologías de redes de automatización industrial, analizando las diferentes soluciones empleadas por dichas tecnologías para hacer frente a los retos planteados.

Por otro lado, en el Capítulo 5 Estándares del IEEE 802.1TSN, se describen las aportaciones y problemas que resuelven los estándares que se han publicado en los últimos años por parte del IEEE en el ámbito de las redes sensibles al tiempo, algunos de los cuales continúan desarrollándose o incluso están pendientes de comenzar.

Finaliza con el Capítulo 6 Conclusiones, en el que se resumen las conclusiones principales de este TFM y se proponen algunas líneas de trabajo futuro.

2 Estado del Arte

En este capítulo se listan otros trabajos en los que se plantean objetivos coincidentes con los de este TFM. En este sentido, se consideran relevantes algunos trabajos que aportan una visión global a la automatización industrial tradicional y en la Industria 4.0, desde el punto de vista de las redes que la soportan.

Como punto de partida, el Trabajo de Fin de Máster [1], de 2015 analiza y presenta las características principales (como topología, medio físico y tasa de transmisión) de un importante número de tecnologías para buses de campo y de Ethernet industrial de uso habitual. Dicho TFM tiene como objetivo seleccionar una tecnología de red de automatización para una aplicación industrial concreta, mientras que este nuevo TFM se orienta al análisis de las diversas tecnologías a nivel de comunicaciones.

Otro documento que presenta una buena visión global de distintas tecnologías tradicionales es la guía [2] del INCIBE (Instituto Nacional de Ciberseguridad), presentada en 2015 y actualizada en 2017. Este guía analiza los mecanismos de seguridad implementados en los protocolos de comunicaciones más empleados en Sistemas de Control Industrial (SCI). En la misma línea existen varios TFM ([3], [4]). Estos documentos ofrecen una buena visión general el ámbito concreto de la seguridad. No obstante, dejan de lado el análisis de la problemática asociada a la comunicación de sistemas en tiempo real que este TFM trata de abordar.

Por otro lado, el documento [5], de 2016 presenta una comparativa de cinco tecnologías de comunicación industrial basadas en Ethernet, que es una de las facetas que este TFM también aborda, aunque el primero lo hace con un enfoque más comercial.

En lo referente a los estándares TSN, el documento [6] de 2018, proporciona una comparativa de estándares y propuestas tecnológicas de mecanismos de red para aplicaciones de ultra baja latencia (ULL, *Ultra-Low Latency*) y el artículo [7] publicado en 2019, de los mismos autores evalúa el desempeño de los estándares TAS (*Time Aware Shaper*) y ATS (*Asynchronous Traffic Shaper*) del 802.1TSN respecto a retardo y pérdida de paquetes en escenarios típicos de redes de control industrial. Estos documentos aportan información interesante sobre el desempeño de estos mecanismos, algo que queda fuera del objetivo de este TFM.

Como se ha explicado en el apartado “Objetivos del Trabajo”, este TFM se diferencia de los anteriores documentos centrándose en entornos sensibles al tiempo y sus retos, propuestas de estandarización del grupo de trabajo 802.1TSN, y alternativas actuales. Se pretende, por tanto, analizar un conjunto de “*tecnologías de comunicación en tiempo real en entornos de automatización industrial*” que, si bien no profundice en ningún aspecto concreto de dichas tecnologías, sea capaz de ofrecer una visión amplia de sus características generales, de su razón de ser, y del estado del arte de dichas tecnologías.

3 Análisis de la problemática

3.1 Introducción

3.1.1 Automatización industrial

Cuando hablamos de automatización industrial nos referimos a “*cualquier intervención automática que ayude a la industria a mejorar y optimizar cualquier proceso que se realice*” [8]. Entre otras ventajas, la automatización industrial permite reducir la mano de obra involucrada en los procesos y garantizar una mayor seguridad para dicho personal, aumentar la producción, reducir el mantenimiento y los problemas técnicos (siempre que se realice un buen seguimiento preventivo) y mejorar la calidad de los productos.

La automatización industrial se basa en el empleo de autómatas o controladores lógicos programables (PLC, *Programmable Logic Controller*), dispositivos capaces de controlar máquinas y procesos secuenciales en tiempo real. Para ello, los PLC deben ser programados con las condiciones necesarias para la aplicación y proceso en el que participa.

El funcionamiento de un PLC se basa en la lectura del estado de los sensores conectados a sus entradas para intervenir consecuentemente sobre los actuadores conectados a sus salidas. Dichas entradas pueden ser analógicas o digitales, y se puede tratar de simples interruptores o bien de sensores capaces de medir variables de diversa naturaleza: biológica, eléctrica, magnética, mecánica, óptica, química, térmica, etc. [9] En cuanto a sus salidas, estas pueden actuar sobre diversos elementos como motores, relés, válvulas, etc.

La interconexión de los PLC con sistemas informáticos permite la programación, supervisión y control del sistema de automatización a través de *software* específico, denominado generalmente como interfaz hombre-máquina (HMI, *Human Machine Interface*) o sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA, *Supervisory Control And Data Acquisition*). Este tipo de sistemas permiten la lectura de variables y escritura de datos, escalado de alarmas, almacenamiento de historial de valores, representación de gráficas y elaboración de informes, control de acceso al sistema, gestión de los equipos conectados, etc. [10]

3.1.2 La Cuarta Revolución Industrial

La adopción de nuevas tecnologías en entornos industriales está produciendo una transformación digital de la industria que algunos vislumbran como una cuarta revolución industrial [11]. Más específicamente, se puede entender esta cuarta revolución industrial como consecuencia de la aplicación de técnicas del internet de las cosas (IoT, *Internet of Things*) para la adquisición masiva de datos en la industria

(IIoT, *Industrial Internet of Things*), a lo que se suman técnicas de procesamiento avanzado de datos como la inteligencia artificial (AI, *Artificial Intelligence*) para automatizar y optimizar los procesos industriales [12]. Esta integración de computación digital y procesos físicos da lugar a los denominados sistemas *ciberfísicos* (CPS, *Cyber-Physical Systems*) [13].

El concepto de Industria 4.0, o como también se denomina frecuentemente, industria inteligente, *smart factories*, *ciberindustria* o industria conectada [14], hace referencia a la evolución de los sistemas de automatización a complejos sistemas que integran gran cantidad de dispositivos capaces de adquirir, producir, procesar y almacenar enormes cantidades de datos, permitiendo realizar un análisis profundo de la información recabada mediante el cual llevar el control de la producción y la optimización de los procesos industriales en tiempo real a un nuevo nivel, incluso anticipándose a las variaciones de la situación.

La fusión de las nuevas tecnologías y su aplicación en estos entornos empresariales ha transformado la forma de hacer negocios. Los sistemas de adquisición y procesamiento de datos se integran en las organizaciones, los procesos y la gestión de los recursos humanos y materiales. Se produce un flujo continuo y cíclico de información entre el mundo físico y el digital, conocido como PDP (*Physical to Digital to Physical*), en el cual se captura información del mundo real, se almacena y procesa digitalmente mediante técnicas avanzadas de inteligencia artificial y análisis de escenarios, y finalmente se aplican algoritmos de decisión que promueven o activan actuaciones con repercusión en el mundo real [15].

Según [14], los pilares básicos de la Industria 4.0 son:

- Información digital.
- Automatización.
- Conectividad.

El último punto podría desglosarse en dos: por un lado, la conectividad con las personas, y por otro, la conectividad entre los sistemas. Con respecto a lo primero, a menudo se hace uso de internet o redes de propósito general, aplicando las pertinentes medidas de seguridad, para el acceso humano de manera ubicua y casi instantánea a la información necesaria para la adecuada toma de decisiones [11] o para el acceso al cliente [14].

Con respecto a la conectividad entre los sistemas, frecuentemente, se hace también uso de internet para la conexión de dispositivos debido al carácter de la información que recogen, almacenan o procesan o a la distancia a la que se encuentren de los centros industriales. Además, por lo general, se precisará de redes específicas y dedicadas para la interconexión de los sistemas críticos de captura de datos, procesamiento, toma de decisiones y actuadores, como se verá en el siguiente apartado.

3.2 Redes de automatización industrial

3.2.1 Introducción a las redes de automatización industrial

A finales de la década de los 80s, Williams, T. J. propone una arquitectura de referencia para sistemas industriales automatizados [16]. Dicho modelo es desarrollado durante la década de los 90s en el modelo de referencia empresarial PERA (*Purdue Enterprise Reference Architecture*) [17], y posteriormente adoptado por la ISA (*International Society of Automation*) y la ANSI (*American National Standards Institute*) en la norma ANSI/ISA-95 [18].

La arquitectura de referencia mencionada representa los diversos niveles de la planta de producción en la denominada “pirámide de automatización”. Existen diversas variantes de dicha pirámide, pero generalmente todas coinciden en presentar una arquitectura de sistema industrial basada en cinco niveles tecnológicos diferenciados por funciones y segmentos de red. De este modo, se distinguen los siguientes sistemas y actividades:

- Nivel 0: Nivel de campo. Incluye los instrumentos (sensores), actuadores y demás *hardware* que forman parte de un proceso productivo o industrial.
- Nivel 1: Nivel de control. Agrupa los dispositivos que controlan equipos productivos o industriales (PLCs, controladores PID, etc.). Emplean los datos proporcionados por los sensores del nivel de campo para controlar los actuadores locales de dicho nivel.
- Nivel 2: Nivel de supervisión. Cuenta con aquellos sistemas destinados a supervisar y controlar la secuencia de fabricación y/o producción (SCADA).
- Nivel 3: Nivel de operación o planificación. Engloba la gestión de flujos de trabajo y ejecución de la producción (MES, *Manufacturing Execution System*).
- Nivel 4: Nivel de gestión. Abarca las actividades de negocio y de gestión integral de la empresa (ERP, *Enterprise Resource Planning*).

La Figura 2 muestra la representación gráfica de la pirámide de automatización según el Centro de Ciberseguridad Industrial:

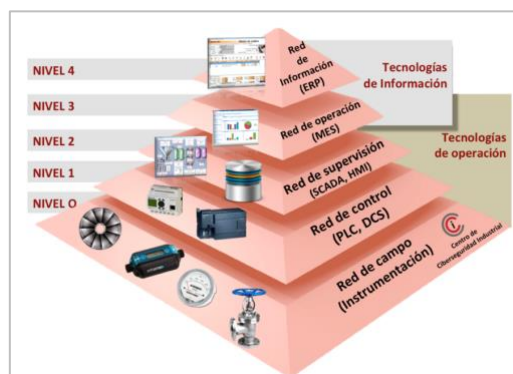


Figura 2 Pirámide de Automatización Industrial [19]

La nueva Industria 4.0 precisa de redes capaces de integrar verticalmente todos los recursos de la planta de producción (humanos, materiales y energéticos) a todos los niveles. Además, aparecen también redes horizontales capaces de crear sinergias entre *partners*, clientes y proveedores [13].

Centrándonos en las redes internas de la empresa, la Figura 2 muestra una división entre las Tecnologías de Operación (OT, *Operational Technology*) y las Tecnologías de Información (IT, *Information Technology*).

Esta separación clásica entre los sistemas que controlan y/o monitorizan eventos, procesos y dispositivos físicos (OT) y sistemas de negocio (IT) aparece cada vez más difusa en la nueva Industria 4.0 [20]. Se emplean masivamente los datos generados por los dispositivos de campo para modificar y optimizar los procesos de negocio, y viceversa. Ambos se retroalimentan, mejorando productos y beneficios.

La pirámide de automatización tradicional, cuando se interpreta de una manera rígida a nivel de equipos, no permite una comunicación fluida entre los diversos niveles que la componen. No obstante, las tecnologías actuales permiten desplazar la lógica de control y supervisión a PCs o incluso sistemas *cloud* [21]. Este desplazamiento o integración de niveles puede verse como el colapso de la clásica pirámide de automatización, o más bien como una reinterpretación de esta, en la que cada nivel engloba funciones lógicas en lugar de dispositivos.

A pesar de este cambio de paradigma en los sistemas de comunicación industrial, podemos observar diferencias en los requisitos de las redes de comunicación en los diferentes niveles. Dependiendo de sistema de producción y del entorno, podemos suponer que a nivel de campo los sensores transmitirán pequeños volúmenes de datos (bits) cada muy pocos milisegundos (1-10ms), mientras que a nivel de control puede precisarse la transmisión de Bytes cada 10-100ms, aumentando a KBytes cada varios segundos a nivel de supervisión y a MBytes cada minutos/horas a nivel de operación [22].

Hasta el nivel 3 se debe gestionar en tiempo real toda la información necesaria para la fabricación de cada unidad de producto. Esto incluye la transmisión de variables del entorno (posiciones, temperaturas, alarmas, etc.), la aplicación de la lógica de control y la intervención sobre actuadores, así como el registro de toda la información generada. Por el contrario, a nivel 4 puede ser suficiente con almacenar registros por lotes o turnos de producción [23].

La organización puede disponer de mayor capacidad de reacción y proactividad cuanto más información y con mayor inmediatez sea gestionada por encima del nivel 4 procedente de los niveles inferiores, y por debajo del nivel 3 procedente de los niveles de negocio.

No obstante, resultaría imposible (y probablemente, innecesario) gestionar toda la información de operación a nivel de negocio en tiempo real. Es necesario, por tanto, hacer una diferenciación entre información que debe gestionarse en tiempo real e información que debe gestionarse en intervalos mayores: se requiere, por un lado, la adquisición y análisis de información en tiempo real para la toma de decisiones de forma inmediata; y se requiere, por otro lado, el almacenamiento y tratamiento de información a frecuencias determinadas para la obtención de conclusiones y tomas de decisiones a posteriori [23].

En adelante, este TFM se centrará en las redes y tecnologías de comunicación que deben dar soporte a la información en tiempo real en estos entornos. Genéricamente, denominaremos a este subconjunto “redes de automatización industrial”, por cuanto sirven directamente de infraestructura de comunicaciones para el control y supervisión tanto de los procesos como de los sistemas de producción.

3.2.2 Retos de las redes de automatización industrial

Centrándonos en las redes que deban dar soporte a los sistemas de automatización destaca, en primer lugar, que la variable temporal es crítica. Es decir, se hace preciso garantizar la transmisión de la información de los sensores a la lógica de control, así como las órdenes a los actuadores, dentro de un margen de tiempo determinado [24]. Este margen de tiempo limitado y asumible se denomina tiempo de ciclo del proceso.

Por lo general, se considera un sistema en tiempo real aquel en el que el tiempo de ciclo de sus procesos es inferior a 10 milisegundos, y su *jitter* (variación del tiempo de ciclo) es inferior al 10% de este [25].

Los sistemas en tiempo real requieren de una tecnología e infraestructura de red que permita transmitir la información en un tiempo tal que el sistema pueda responder adecuadamente dentro de su tiempo de ciclo. Por lo tanto, la red debe tener capacidad de actuación en tiempo real.

La capacidad de actuación en tiempo real de una red la proporcionan tres parámetros: ancho de banda, latencia y *jitter*. Para que una red sea capaz de ofrecer comunicación en tiempo real debe contar con unos valores adecuados de estos tres parámetros, siendo los límites de estos valores altamente dependientes del sistema al que da soporte la red.

Por otro lado, estas nuevas redes deben permitir la integración de sensores, actuadores y sistemas de control en un sentido amplio, y de distintos fabricantes. Al objeto de poder garantizar la adecuada interacción entre tal variedad de dispositivos, se hace necesario el empleo de estándares comunes.

La integración de las redes a diferentes niveles, así como el acceso remoto a estas, implica un incremento de la conectividad de los

dispositivos que forman parte de los procesos industriales. Para minimizar los riesgos, se intenta en la medida de lo posible separar y/o controlar el flujo de información entre segmentos diferenciados. A pesar de esta separación, se produce un incremento del riesgo que debe gestionarse adecuadamente. Surge por tanto la necesidad de implementar nuevas políticas y mecanismos de seguridad en los niveles bajos, con medidas que tradicionalmente se habían reservado para los niveles altos. De este modo, las nuevas redes de automatización industrial deben garantizar los siguientes aspectos de seguridad:

- Privacidad
- Control de acceso
- Disponibilidad

3.2.3 Ethernet en redes de automatización industrial

Las redes de uso general más empleadas actualmente poseen varias cualidades muy beneficiosas para su uso en automatización industrial: interoperabilidad, libre de patentes, escalabilidad en las infraestructuras, acceso a los dispositivos de campo desde cualquier punto de la red, mantenimiento y prestación de servicio remoto, *hardware* económico, altas tasas de transmisión, etc. Sin embargo, a pesar de su alto rendimiento, no pueden garantizar un retardo máximo en la comunicación.

Si tomamos por ejemplo el caso de Ethernet, a nivel de enlace se emplea como método de acceso al medio la técnica de acceso múltiple con escucha de portadora y detección de colisiones (CSMA/CD, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), cuyo funcionamiento se explica de manera simplificada a continuación:

- Cuando una estación desea transmitir, antes realiza una escucha de la portadora para comprobar que el medio esté libre.
- Si varias estaciones comienzan a transmitir a la vez o antes de que sean capaces de detectar que otra estación está transmitiendo, se producirá una colisión.
- Si una estación detecta una colisión, interrumpirá su transmisión y enviará una señal denominada de *Jam* (interferencia o atasco) para informar de la colisión al resto de estaciones, y que estas también interrumpan su transmisión.
- A continuación, las estaciones esperarán un número entero aleatorio de veces (dentro de un rango) de *time slots* antes de volver a intentar la transmisión.
- Si en el nuevo intento de transmisión se vuelve a detectar una colisión, el rango de múltiplos posibles se duplica, de modo que la probabilidad de que dos estaciones elijan aleatoriamente transmitir en el mismo instante se reduce de manera exponencial.
- Pasado un número máximo de reintentos posible sin éxito (16), se informa de error a los niveles superiores.

En las redes Ethernet, la probabilidad de colisión aumenta en función del número de estaciones conectadas a la red (o más correctamente, en función del factor de utilización de la red). La probabilidad de colisión

también aumenta en función del tamaño físico de la red, dado que cuanto mayor sea la distancia entre estaciones, mayor es el tiempo que tiene que pasar desde que una estación comience a transmitir hasta que otra estación detecte dicha transmisión.

Se dice que las redes Ethernet son no deterministas dado que, según se ha explicado, es imposible conocer el tiempo necesario para que una estación que sea capaz de realizar una transmisión satisfactoria. Por tanto, este tipo de redes no puede servir, a priori, como infraestructura de comunicaciones en un sistema crítico en tiempo real.

El empleo de redes Ethernet full-dúplex (estándar desde hace años), así como *switches* para la separación de segmentos de red con número reducido de estaciones en dominios de colisión independientes, ha permitido reducir de manera muy considerable la probabilidad de colisión en las redes Ethernet actuales. Por otro lado, los estándares de priorización de mensajes sobre Ethernet (IEEE 802.1p) permiten establecer diferentes clases de tráfico para su tratamiento de manera diferenciada. No obstante, debe tenerse en cuenta la introducción de retrasos adicionales (*delay*) por parte de los *switches*, así como el riesgo estadístico y consecuencias de la pérdida o retraso de paquetes en estas redes, para estudiar la viabilidad de su empleo en la aplicación objetivo.

Existe un importante número de soluciones propuestas para solventar la falta intrínseca de determinismo en Ethernet, permitiendo su empleo en sistemas en tiempo real. En 2013 se contabilizaban más de 30 soluciones de Ethernet en tiempo real [26]. Dichas soluciones pasan necesariamente por la eliminación de CSMA/CD para evitar los problemas anteriores. Generalmente también se suprimen las capas TCP/UDP/IP (o bien, se modifican las capas TCP/IP, en función de los requisitos del sistema) dado el *jitter* que introducen los protocolos UDP e IP [25].

La organización PNO (*PROFIBUS Nutzerorganisation*) realizó en 2005 una clasificación de las comunicaciones en tiempo real basadas en Ethernet, estableciendo cuatro clases: la clase 0 (*Non-Real Time*, NRT) no tiene requerimientos temporales especiales, por lo que se basa en productos estándar; la clase 1 (*Soft Real Time*, SRT) se basa en productos estándar Ethernet optimizados para este uso; la clase 2 (*Hard Real Time*, HRT) se basa en funciones añadidas mediante *software* empleando *hardware* estándar; por último, la clase 3 (*Isochronous Real Time*, IRT) requiere implementación *hardware* de nuevas funcionalidades [24] [27].

Por su parte, la ya disuelta organización IAONA (*Industrial Automation Open Network Alliance*) publicó también en 2005 su propia clasificación, basándose en requerimientos de parámetros como ancho de banda, latencia y *jitter* [28]. En dicha clasificación, la IAONA evita aplicar las posibles categorías a tecnologías existentes concretas, debido a que estas no habían sido suficientemente evaluadas en base a los criterios de clasificación. La Tabla 3 muestra una posible clasificación, según [25], de algunos protocolos de comunicaciones industriales basados en Ethernet,

según el tiempo típico de transferencia de datos (equivalente al tiempo de ciclo del proceso).

	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3
Tiempo de ciclo	~100 ms	~10 ms	< 1ms
Protocolo	Ethernet/IP Modbus/TCP Profinet (CBA)	Profinet (RT)	EtherCAT Ethernet Powerlink Profinet (IRT)
	Sercos III		

Tabla 3 Clasificación de protocolos basados en Ethernet [25]

No obstante, esta clasificación puede verse alterada por múltiples factores, como el tamaño de los paquetes de datos del sistema (*payload*), tamaño de la red, número de nodos, empleo de conmutadores, etc. El análisis del comportamiento de varios protocolos industriales basados en Ethernet, según [29], muestra que prácticamente cualquier protocolo industrial basado en Ethernet empleando un ancho de banda de 1 Gb/s es capaz de ofrecer tiempos de ciclo inferiores a 1 ms para redes de 100 nodos. La Figura 3 muestra la variación del tiempo mínimo de ciclo en función del número de nodos y del ancho de banda de la red con un *payload* constante de 100 bytes.

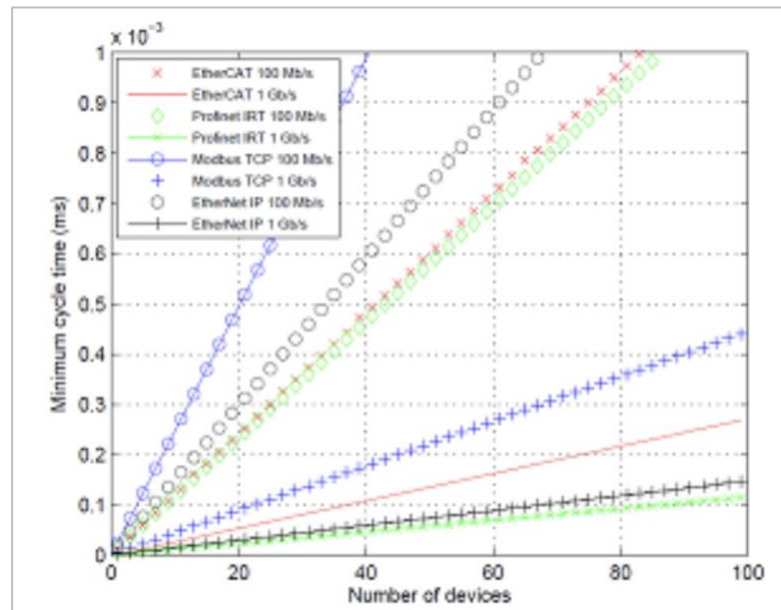


Figura 3 Tiempo mínimo de ciclo en función del número de dispositivos, con *payload* de 100 bytes y bitrates de 100 Mbps y 1 Gbps [29]

Solventado el problema temporal, no cabe duda de que el resto de las características propias de las redes Ethernet coinciden con aquellas listadas en el primer párrafo de este apartado. En definitiva, estas nuevas soluciones basadas en Ethernet pueden ser perfectamente válidas en entornos de automatización industrial, tal y como se mostrará en el Capítulo 4 de este TFM, si bien deberán tenerse en cuenta las características concretas de la red y del entorno en el que esta se despliega.

3.2.4 La transición de las redes de la Industria 3.0 a la Industria 4.0.

La integración vertical de todos los niveles de la pirámide de automatización está provocando un cambio de paradigma frecuentemente representado como una transición de la pirámide de automatización al denominado “pilar de automatización” [30], mostrado en la Figura 4.

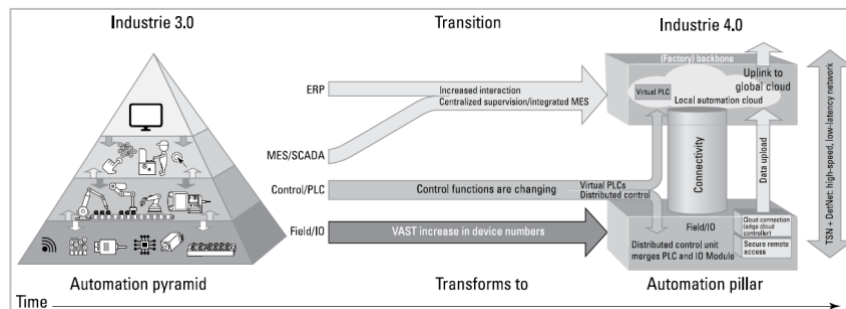


Figura 4 De la pirámide de automatización al pilar de automatización [30]

El pilar de automatización mantiene un nivel de campo en su parte más baja. Este nivel incluye un número muy superior de dispositivos de campo, lo que permite un análisis y control mucho más preciso. Además, incluye dispositivos de control distribuido para aplicaciones de alta velocidad (por ejemplo, seguridad), los cuales integran funciones de dispositivos de campo con funciones del nivel de control.

Otra parte de las funciones de control pasan al nuevo nivel troncal, desapareciendo el nivel de control. Estas funciones aparecen en forma de unidades de control centralizado o PLC virtuales ubicados en la nube local de automatización. La virtualización de los PLCs permite una mayor flexibilidad, por ejemplo, para mover dispositivos o potencia de proceso donde haga falta. El nivel troncal, además de lo anterior, también engloba las funciones de los niveles de supervisión, operación e información.

Entre el nivel troncal y el nivel de campo aparece el nivel de conectividad, que permite la interconexión entre la nube local de automatización y el nivel de campo a alta velocidad y baja latencia y *jitter*. Adicionalmente, el nivel de conectividad permite el intercambio de tráfico no prioritario entre el nivel de campo y el nivel troncal, de manera que no afecte al tráfico en tiempo real. El tráfico no prioritario procedente del nivel de campo se agrega en la nube local de automatización para ser analizado a gran escala (*big-data analytics*) con el fin de optimizar procesos. El nivel troncal puede estar a su vez conectado a una nube central que permita la agregación y análisis de datos de múltiples factorías.

A lo largo de este TFM se analizarán algunas de las tecnologías de redes industriales tradicionalmente utilizadas en la Industria 3.0, así como su potencial como tecnología habilitadora para la función del nivel de conectividad de la Industria 4.0. Asimismo, se presentarán los nuevos estándares desarrollados o en desarrollo por parte del grupo de trabajo IEEE 802.1TSN capaces de dar soporte al citado nivel de conectividad.

3.3 Resumen y conclusiones

En este capítulo se ha presentado el concepto de automatización industrial como intervención automática destinada a mejorar y optimizar los procesos industriales, y basada en el empleo de sensores que captan la información del entorno y la envían a un dispositivo controlador (PLC). Este a su vez analiza dicha información y envía consecuentemente órdenes de control a dispositivos actuadores.

También se ha explicado el modelo tradicional de pirámide de automatización, con cinco niveles separados, escasamente intercomunicados y con funciones claramente diferenciadas: niveles de campo, control y supervisión (OT o funciones de operación), y niveles de planificación y gestión (IT o funciones de negocio).

Se han analizado los retos que presentan los sistemas de comunicaciones para los sistemas de OT, o redes de automatización industrial. Los sistemas de los niveles de campo y de control trabajan en **tiempo real**, por lo que deben cumplir unos estrictos requisitos temporales. La información suele transmitirse en pequeños volúmenes de datos, pero **de manera cíclica, con una alta frecuencia, baja latencia, y bajo jitter, garantizando el tiempo de ciclo de los procesos.**

Por otro lado, se ha expuesto cómo la integración de las nuevas tecnologías digitales en los sistemas de automatización industrial está dando lugar a una cuarta revolución industrial (**Industria 4.0**). Aparecen las *smart factories*, con complejos sistemas de automatización formados por una **gran cantidad de dispositivos, capaces de generar y procesar enormes cantidades de datos** con los que de forma automática se optimizan tanto los procesos industriales como los de negocio, con anticipación a la situación. **Existe un flujo continuo y cíclico de información entre los sistemas de control de producción y los sistemas de negocio, en el que la conectividad cobra protagonismo.**

En este entorno, se produce una transformación de la pirámide de automatización hacia el **pilar de automatización**, con tres niveles: nivel de campo (que ahora integra también funciones de control distribuido), nivel troncal (que integra funciones de control centralizado, supervisión, planificación y gestión), y **nivel de conectividad**, que asegura la interconexión entre los dos niveles anteriormente descritos, garantizando el flujo de información tanto en tiempo real como información no prioritaria.

Se concluye que las redes de la Industria 4.0 deben permitir el **flujo vertical de información** de aplicaciones genéricas entre todos los sistemas OT e IT, pero **garantizando y priorizando el tráfico en tiempo real** para las funciones de OT. Además, deben ofrecer compatibilidad con todo tipo de dispositivos de múltiples fabricantes, por lo que se hace necesario el empleo de **tecnologías estandarizadas**. Esto, a su vez, supone un incremento del riesgo en cuanto a la **seguridad del sistema**, que debe garantizar privacidad, control de acceso y disponibilidad.

4 Protocolos de comunicación para redes de automatización industrial

4.1 Introducción

En primera instancia se podría realizar una clasificación de las redes industriales en tres categorías, según los protocolos de comunicación empleados en los niveles bajos: buses de campo (*fieldbus*), redes basadas en Ethernet, y redes inalámbricas [31]. La Figura 5 muestra algunas de las tecnologías más empleadas, organizadas según dicha clasificación.

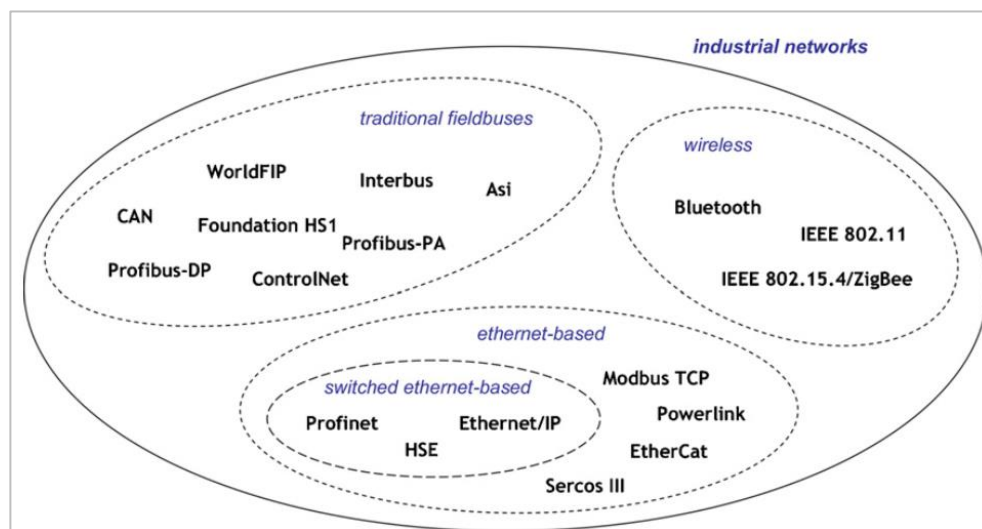


Figura 5 Clasificación de las redes industriales según niveles bajos [31]

El origen de los buses de campo se remonta a finales de la década de 1970 [32] y principios de la década de 1980, integrándose ampliamente en la industria en la década de 1990 [33]. Su propósito era simplificar la tecnología de las conexiones punto a punto, en la cual cada dispositivo controlado tenía que conectarse físicamente de manera individual con el dispositivo controlador. El nacimiento de los buses de campo permitió aumentar enormemente las posibilidades de interconexión de dispositivos reduciendo al mismo tiempo la cantidad de cable necesario, con todo lo que ello conlleva (reducción de costes, reducción de peso en vehículos, aumento de la escalabilidad, etc.)

Tradicionalmente, los buses de campo han sido las tecnologías de comunicación más comúnmente empleadas a nivel de campo (ver la pirámide de automatización en el apartado 3.2.1) [31]. La necesidad de cada vez mayores tasas de transmisión, de interconectar más dispositivos, y de ofrecer compatibilidad con servicios y redes de negocio (ver apartado 3.2.3) han favorecido la adopción gradual de redes basadas en Ethernet en entornos industriales, impulsadas tanto por organizaciones (por ejemplo, IAONA) como por fabricantes (por ejemplo, Rockwell). Las redes industriales basadas en Ethernet recurren al modelo TCP/IP, aunque a menudo se emplean modificaciones o ampliaciones del modelo

genérico con el fin de ofrecer un comportamiento determinista y/o poder sustentar con seguridad tareas en tiempo real.

Lo mismo ocurre con las redes inalámbricas, cuya facilidad y flexibilidad de despliegue son características que están impulsando su introducción en el mundo industrial. Si bien no existen estándares de comunicación inalámbricos orientados a la automatización industrial ampliamente utilizados actualmente, lo cierto es que una parte del mercado actual recurre a protocolos de uso general (IEEE 802.11 – Wi-Fi; IEEE 802.15 – Bluetooth y Zigbee; etc.) para su implementación en aquellos entornos en los que las características ofrecidas por dichos protocolos se adecúen al sistema [33].

De acuerdo con [34] y en base a las tendencias del mercado observadas en años previos, se prevé que el 59% de los nuevos nodos de redes industriales instalados en 2019 serán dispositivos de Ethernet industrial, mientras que los nuevos nodos para redes basadas en bus de campo supondrán un 35 %. Por primera vez, en 2018 las nuevas instalaciones de nodos de Ethernet industrial superaron a las de nodos de buses de campo, y también por primera vez, en 2019 se prevé una disminución en el número de nodos basados en buses de campo con respecto al año precedente. La cuota de mercado de nuevos nodos para redes inalámbricas industriales se prevé constante en 2019 con respecto al año anterior (un 6% del total), lo cual supone un crecimiento interanual del 30% en número de dispositivos. La Figura 6 muestra el reparto de mercado de nuevos dispositivos industriales previsto para 2019, según la tecnología de red empleada (entre paréntesis, los datos de 2018).

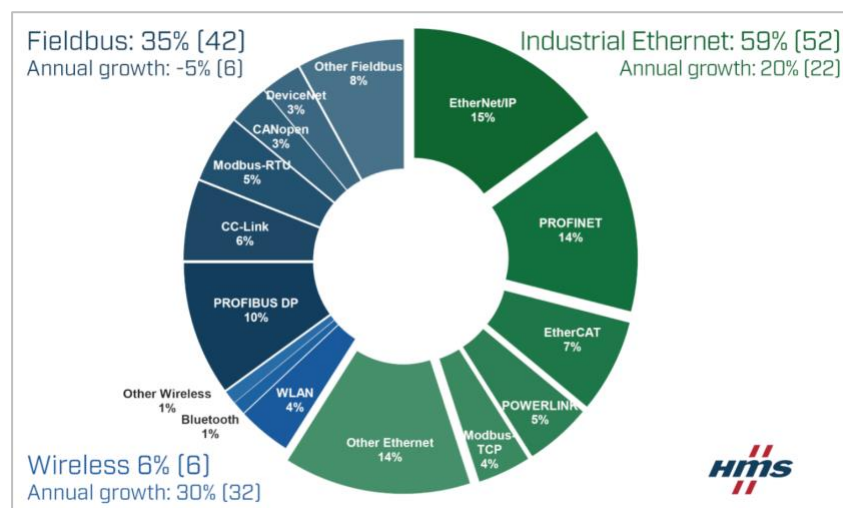


Figura 6 Cuota de mercado de redes industriales en 2019 [34]

A lo largo de los siguientes apartados de este capítulo se repasan las tecnologías de comunicación más representativas de entre las existentes actualmente para redes de automatización industrial. Se tratará de dar una visión general de dichas tecnologías, explicando el funcionamiento básico de los protocolos empleados para, a partir de dichas explicaciones, ver la idoneidad de su empleo en redes de automatización industrial en

tiempo real según los retos planteados en el apartado 3.2.2 y en función de las aplicaciones industriales a las que potencialmente dan soporte. Finaliza el capítulo con unas ideas generales a modo de conclusiones sobre las tecnologías analizadas y un cuadro comparativo entre dichas tecnologías.

4.2 CIP

4.2.1 Protocolo de nivel de aplicación CIP

CIP (*Common Industrial Protocol*, protocolo industrial común) es un protocolo de nivel de aplicación diseñado por ODVA para la automatización de procesos industriales [35]. La especificación de las redes CIP se encuentra estandarizada bajo los siete volúmenes editados por ODVA que forman la *CIP Networks Library*, y que pueden ser adquiridos bajo suscripción. Asimismo, su especificación es conforme al estándar internacional IEC-61158 (en concreto, la CPF 2, *Communication Profile Family 2*). Los fabricantes que deseen ser autorizados para distribuir productos o soluciones basadas en CIP deben adquirir una licencia específica [36].

El protocolo CIP sigue un modelo orientado a objetos [35]. Cada objeto CIP tiene unos atributos (datos), servicios (acciones explícitas), conexiones y comportamientos (reacciones a eventos). Existe una amplia librería de objetos y extensiones orientados a gestionar y controlar diversos aspectos en entornos de automatización industrial: seguridad (CIP Security / CIP Safety), energía (CIP Energy), sincronización (CIP Sync), movimiento (CIP Motion), etc.

El modelo de objetos de CIP sigue una arquitectura consumidor-productor. Los mensajes son identificados por un identificador (ID) de la conexión, en lugar de por el destinatario del mensaje. Si un consumidor requiere que se transmitan ciertos datos a la red cada vez que estos se produzcan, solo tiene que solicitarlo una vez. Cada nodo adicional que quiera consumir dichos datos, solo precisa conocer el ID de la conexión.

Se definen tres clases de dispositivos en función de sus capacidades de comunicación. Cada clase implica que el dispositivo en cuestión implemente, como mínimo, un conjunto básico de servicios, pudiendo además ofrecer otros servicios opcionales. Estas clases son las siguientes:

- *Messaging Class* (mensajería): Soportan únicamente el intercambio de mensajes explícitos, esto es, información de propósito general y no en tiempo real, como parametría de configuración, supervisión y diagnóstico, etc. Ejemplos de este tipo de dispositivos son interfaces de configuración y programación de PLCs o productos HMI, aplicaciones de configuración de red, etc.
- *Adapter Class* (adaptador): Soportan el intercambio de mensajería explícita (generalmente iniciado por un dispositivo *messaging* o *scanner*), así como el intercambio de mensajes implícitos

(mensajes de aplicación en tiempo real o *I/O data*) pero esto último siempre bajo petición de un dispositivo de tipo *scanner*. Ejemplos de esta clase de dispositivos son actuadores, sensores y otros dispositivos de entrada y salida que consumen y/o producen datos en tiempo real destinados a u originados por un controlador o PLC.

- *Scanner Class* (escáner): Originan peticiones de intercambio de mensajería implícita con dispositivos de clase *adapter* o con otros dispositivos de clase *scanner*. Asimismo, son capaces de originar y/o intercambiar mensajería explícita con todas las clases de dispositivos. Ejemplos de este tipo de dispositivos son PLCs, controladores basados en PC, etc.

El protocolo CIP no define mecanismos de seguridad y es incompatible con el cifrado de las comunicaciones [2]. Asimismo, implementa objetos obligatorios que facilitan el descubrimiento de equipos de la red, y objetos de aplicación comunes que permitirían a un intruso manipular dispositivos. La protección de los sistemas CIP debe basarse en el aislamiento lógico de la red, siendo recomendable sistemas de monitorización de tráfico y de detección y prevención de intrusos (*IDS/IPS*, *Intrusion Detection/Prevention System*).

Como se ha explicado, el protocolo CIP se ubica a nivel de aplicación del modelo OSI. De este modo, cuenta con diversas adaptaciones ofrecidas por el mismo desarrollador para su implementación sobre diferentes redes o pilas de protocolos, tal y como se muestra en la Figura 7.

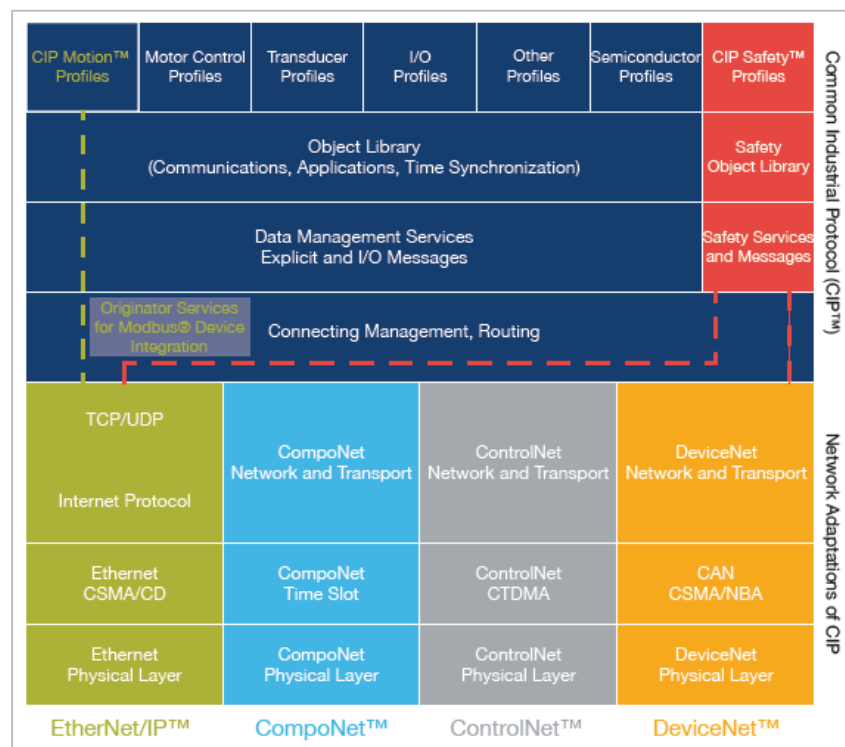


Figura 7 Arquitectura de protocolo CIP. Posibles implementaciones [37]

La interconexión entre redes CIP heterogéneas con diferentes niveles inferiores es posible mediante puentes y enrutadores accesibles a través

de objetos CIP, los cuales gestionan el correcto manejo de los mensajes que pasan de una red a otra.

En los siguientes subapartados se profundizará en las diversas implementaciones de CIP, analizando cómo la integración de este protocolo con distintas tecnologías hará más adecuado el empleo de CIP para unas u otras aplicaciones, y especialmente como el aprovechamiento de diversos mecanismos de acceso al medio permitirán o no proporcionar servicios de transmisión deterministas, haciéndolo apropiado para su uso en aplicaciones en tiempo real.

4.2.2 DeviceNet

DeviceNet es una implementación del protocolo CIP, empleando bus CAN (*Controller Area Network*) en los niveles físico y de enlace, y una capa específica a nivel de red y transporte [37].

El protocolo CAN (ISO 11898) nace en la década de los 80's de la mano de Bosch como un sistema de comunicaciones orientado a la interconexión de dispositivos en automóviles e industria aeronáutica, siendo empleado en la actualidad por prácticamente la totalidad de los coches que se fabrican hoy en día [38].

El nivel físico del protocolo CAN define una topología de tipo bus con derivaciones (*trunkline-dropline*). Soporta redes de hasta 64 nodos y tasas de transmisión de 125, 250 y 500 kbps en función del tipo del cable y distancia entre nodos, tal y como se puede ver en la Tabla 4. El máximo número de nodos de estas redes las hacen apropiadas, como se ha dicho, para interconectar los sensores de un dispositivo medianamente complejo como un automóvil moderno, pero no para integrar sensores de manera masiva en una planta industrial.

Medio \ Tasa de transmisión	125 kbps	250 kbps	500 kbps
Cable redondo grueso	500 m	250 m	100 m
Cable redondo fino	100 m	100 m	100 m
Cable plano	420 m	200 m	75 m
Long. Máx. derivación	6 m	6 m	6m
Long. Máx. acumulada derivaciones	156 m	78 m	39 m

Tabla 4 Longitud máxima del bus DeviceNet según el medio y bitrate [37]

Se emplea cable apantallado con dos pares de hilos de cobre, de manera que un par transmite datos y otro par puede proporcionar alimentación (24 Vdc) [39]. Los conductores del par de datos se denominan CAN_H y CAN_L, y operan en modo diferencial. Se definen dos niveles lógicos denominados “dominante” (‘0’ lógico) y “recesivo” (‘1’ lógico), siendo la diferencia de tensión $V_{diff} = V_{CAN_H} - V_{CAN_L}$ mayor a cierto umbral mínimo para el nivel dominante, y menor a cierto umbral máximo para el nivel recesivo, como se muestra en la Figura 8.

Debido a la implementación física de los estados lógicos definidos en CAN, el bus solo puede estar en estado recesivo si no hay ningún nodo transmitiendo el nivel dominante.

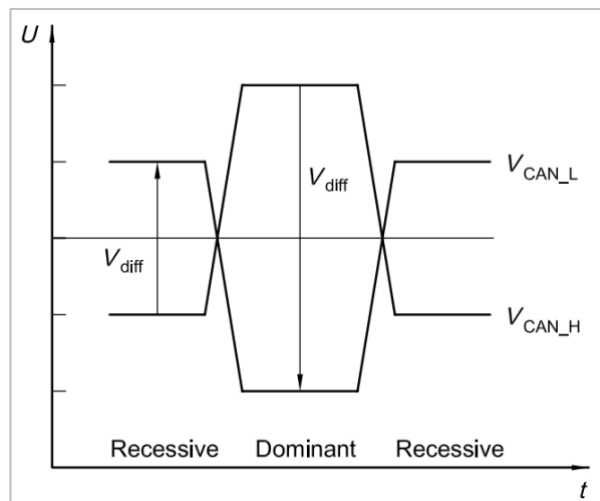


Figura 8 Representación física de bits en bus CAN [40]

El bus CAN emplea el método de acceso al medio CSMA/NBA (*Carrier Sense Multiple Access with Non-destructive Bit-wise Arbitration*, Acceso Múltiple con Escucha de Portadora y Arbitraje de Bit No destructivo). Este método de acceso al medio se basa en lo siguiente:

- Cuando una estación desea transmitir, realiza una escucha de la portadora para comprobar si el medio está libre, en cuyo caso procederá a transmitir.
- Mientras una estación transmite, se mantiene escuchando el medio para asegurarse de que lo que transmite es lo mismo que detecta. En caso contrario, significa que ha habido una colisión.
- Una trama CAN comienza con un bit de comienzo de trama (SoF, *Start of Frame*) seguido de 11 bits que identifican al nodo origen. Si mientras que se transmite el campo identificador, la estación detecta una colisión (lo cual solo puede detectarse en caso de que la estación esté transmitiendo un bit recesivo y reciba un bit dominante), la estación interrumpirá su transmisión. A pesar de la colisión, el bit dominante sigue siendo válido como parte de la trama transmitida por la otra estación.
- Por lo tanto, la estación que se encontraba transmitiendo el bit dominante resulta vencedora del arbitraje y continúa su transmisión sin interrupción. Obsérvese que este método sigue siendo válido cuando son más de dos las estaciones transmitiendo simultáneamente, teniendo siempre la mayor prioridad aquella estación con un identificador más bajo.

A nivel de red y transporte, DeviceNet se comporta como un protocolo orientado a la conexión, empleando como dirección de red el propio identificador CAN del nodo.

Debido a que, tal y como ocurría con CSMA/CD (ver 3.2.3), el funcionamiento de CSMA/NBA impide conocer a priori el tiempo máximo

para realizar una transmisión satisfactoria, resulta imposible implementar un protocolo determinista sobre bus CAN salvo que se prescindiera de dicho protocolo de acceso al medio. Esto podría implementarse con estrictas reglas a nivel de aplicación que limiten el tamaño y cantidad de los mensajes enviados por las estaciones, así como los instantes en los que cada estación puede transmitir, a fin de garantizar la disponibilidad del medio cuando una estación deba transmitir.

En efecto, DeviceNet proporciona la posibilidad de establecer conexiones maestro/esclavo de tres tipos:

- Por sondeo (*polled*): El nodo *master* interroga si tiene algo que transmitir a un nodo *slave*, tras lo cual el nodo *slave* interrogado podrá enviar los datos que tenga que transmitir. El *master* continuará interrogando a cada *slave* de manera secuencial. La tasa de sondeo del *master* dependerá de parámetros como la tasa de transmisión de la red, número de dispositivos conectados, tamaño de los mensajes, etc.
- Cíclico: Cada nodo puede enviar mensajes en intervalos de tipo definidos.
- Cambio de estado (CoS, *Change of State*): Un nodo envía mensajes solamente cuando cambia su estado, y/o bien antes de que venza un temporizador (mensajes *heartbeat* para notificar que el nodo continúa activo)

Según lo explicado, una adecuada configuración de una red DeviceNet en la que los nodos sigan un esquema maestro/esclavo de tipo *polled* o cíclico, bajo una correcta sincronización, permitirá ofrecer un comportamiento determinista [37]. Por tanto, dicha red será válida para sistemas en tiempo real siempre y cuando la tasa de transferencia de mensajes de la red sea suficiente para el sistema (considerando, como se ha dicho, el número de nodos, tasa de transmisión de la red, tamaño de los mensajes, etc.).

4.2.3 ControlNet

ControlNet es una implementación del protocolo CIP sobre protocolos físico, de enlace, y de red y transporte propios. Su característica más diferenciadora es el empleo de CTDMA (*Concurrent Time Domain, Multiple Access*, Acceso Múltiple por Dominio de Tiempo Concurrente) como método de acceso al medio [41].

Este protocolo admite topologías en bus con derivaciones (*trunkline-dropline*), en anillo, en estrella y en árbol, así como combinaciones de estas mediante el empleo de repetidores. Soporta tasas de transmisión de hasta 5 Mbps, y un número de nodos variable hasta un máximo de 99, en función del medio y distancia entre nodos, tal y como se puede ver en la Tabla 5. En todos los casos, la longitud máxima de cada derivación es de 1 metro.

Medio \ Nodos	2 nodos	32 nodos	48 nodos	99 nodos
Coaxial	1000 m	500 m	250 m	Requiere repetidor y segmentación
Fibra	Dependiente de fibra y terminaciones			

Tabla 5 Longitud máxima de bus ControlNet según el medio [41]

Como cable coaxial emplea RG-6, mientras que en caso de fibra óptica se puede utilizar multimodo de salto de índice para distancias de hasta 300m, o bien de índice gradual o monomodo para distancias de hasta 3.000m. Mediante el empleo de repetidores se pueden interconectar diferentes medios, así como aumentar la distancia máxima entre nodos. No obstante, debe tenerse en cuenta tanto la distancia máxima entre nodos como el número de repetidores y retraso introducido por estos, de manera que no se exceda un máximo de 120 μ s en el peor caso.

A nivel de enlace, como se ha mencionado, se emplea CTDMA como método de acceso al medio. El funcionamiento de CTDMA se basa en un reparto del tiempo en ciclos denominados NUT (*Network Update Time*) de duración configurable entre 2 y 100 ms. Cada NUT se divide, a su vez, tres fases repartidas mediante parámetros también configurables. Estas fases son, en primer lugar, un periodo de tiempo reservado para información en tiempo real (*scheduled service time*, o *scheduled bandwidth*), seguido de otro periodo para información no críticamente dependiente del tiempo (*unscheduled service time* o *unscheduled bandwidth*), y un periodo de guarda (*maintenance service time*), tal y como se explica en [42] y se resume a continuación.

Durante la fase *scheduled* cada nodo tiene reservado en cada NUT, por orden de prioridad (de menor a mayor dirección de nivel de enlace o MAC ID), una única franja temporal (*time slot*) para transmitir. Si un nodo no tiene nada que transmitir, enviará un mensaje para indicar que continúa activo. Si un nodo no transmite ni tan siquiera dicho mensaje de actividad, el siguiente nodo esperará a que venza un temporizador para comenzar su transmisión.

A diferencia de la anterior, durante la fase *unscheduled* se emplea una planificación *round robin* de modo que cada nodo, por orden de prioridad (de menor a mayor MAC ID), transmite tanta información *unscheduled* como desee. Si un nodo no transmite, el siguiente nodo espera hasta que venza un temporizador para comenzar su transmisión. Si todos los nodos finalizan sus transmisiones antes de que el tiempo de esta fase se agote, comienza de nuevo la secuencia. No obstante, solo se garantiza que un nodo (el primero) pueda transmitir durante esta fase, ya que esta podría finalizar antes de que el resto haya tenido su oportunidad. En cada NUT, la MAC ID del nodo que comienza a transmitir en esta fase se incrementa, a fin de dar la posibilidad a todos los nodos de enviar información *unscheduled* al cabo de un cierto número de NUTs.

Por último, durante el tiempo de guarda, el nodo moderador del enlace (aquel con MAC ID menor) distribuye al resto de nodos los parámetros de configuración a nivel de enlace. Aunque varios enlaces se encuentren interconectados mediante repetidores, cada enlace mantiene su propio moderador y los parámetros pueden ser diferentes en cada uno de ellos.

A nivel de red/transporte, ControlNet soporta dos tipos de servicios, uno no orientado a la conexión y otro orientado a la conexión [41]. El servicio no orientado a la conexión utiliza siempre el ancho de banda *unscheduled*, y se utiliza para el establecimiento de conexiones y para el envío de mensajes de baja prioridad y poco frecuentes. En cuanto al servicio orientado a la conexión, se distinguen dos tipos de conexiones: explícita e implícita. Las conexiones explícitas son conexiones punto a punto que se establecen para soportar transacciones tipo solicitud-respuesta de propósito general, y emplean el ancho de banda *unscheduled*. Por el contrario, las conexiones implícitas se emplean para el envío de datos *multicast* específicamente relacionados con la aplicación o sistema (*I/O data*).

Según lo explicado, una red ControlNet presenta un comportamiento determinista y al mismo tiempo suficientemente flexible para acomodar mensajes adicionales que no necesiten dicho comportamiento [42]. Por tanto, dicha red será válida para sistemas en tiempo real con un periodo de refresco máximo de hasta 2 ms, siempre y cuando la tasa de transferencia de mensajes de la red sea suficiente para el sistema (teniendo en cuenta, como es obvio, el número de nodos, tasa de transmisión de la red, tamaño de los mensajes, etc.).

El máximo número de nodos de las redes ControlNet indica, no obstante, que no están concebidas para la integración masiva de sensores propia de las nuevas *ciberindustrias*. El empleo de ControlNet ha venido siendo habitual como *backbone* para la interconexión de múltiples redes DeviceNet distribuidas y en aplicaciones como “*líneas de montaje de vehículos, procesamiento de comida o gestión de equipaje*” [42].

4.2.4 CompoNet

CompoNet es una implementación completa del protocolo CIP sobre niveles de red/transporte, enlace y físico propios. A nivel físico permite el empleo de diversos tipos de cable como medio de transmisión, como cable VCTF formado por un par de hilos de cobre sin apantallar, o cable plano específico [43].

Permite una gran libertad a la hora de planificar la topología de la red mediante el empleo de hasta 64 repetidores para interconectar el bus troncal a múltiples derivaciones (hasta 3 niveles de segmentos), incluso con variados cables de diferentes tipos y distintas características eléctricas. En función de ello, soporta hasta 384 nodos (32 por segmento) y tasas de transmisión de 93,75 kbps, 1,5 Mbps, 3 Mbps y 4 Mbps. La

Tabla 6 muestra la longitud máxima de los segmentos, en función de la tasa de transmisión.

Bitrate Rama	93,75 kbps	1,5 Mbps	3 Mbps	4 Mbps
Medio: 2 hilos x 0,75 mm ₂				
Troncal	500 m	100 m / 30 m	30 m	30 m
Long. Máx. Derivaciones	6 m	- / 2,5 m	0,5 m	-
Long. Máx. Acumulada Derivaciones	120 m	- / 25 m	8 m	
Medio: Cable plano 4 hilos				
Troncal	200 m	30 m	30 m	30 m
Long. Máx. Derivaciones	Topología libre	2,5 m	0,5 m	-
Long. Máx. Acumulada Derivaciones		25 m	8 m	

Tabla 6 Longitud máxima del bus CompoNet según el medio y bitrate [44]

A nivel de enlace implementa una capa MAC (*Media Access Control*, Control de Acceso al Medio) basada en TDMA (*Time Division Multiple Access*, Acceso Múltiple por División de Tiempo). En una red CompoNet, un nodo actúa como *máster* controlando la sincronización del resto de nodos esclavos (*slaves*) de la red, de modo que el medio se emplea de la manera más eficiente posible, sin tiempo vacío entre tramas de distintos nodos. Cada nodo dispone de un tiempo limitado durante el cual envía cierta cantidad de información en cada ciclo de la comunicación.

Las direcciones de los nodos esclavos pueden ser de entrada o de salida, y a su vez cada una de estas pueden ser de tipo “*word*” o de tipo “*bit*”. Las direcciones de tipo *word* permiten la transmisión de 16 bits por ciclo, y el rango de direcciones es de 64 direcciones de entrada y 64 de salida. Las direcciones de tipo *bit* permiten la transmisión de 2 bits por ciclo, soportando hasta 128 direcciones de entrada y 128 direcciones de salida adicionales. Esto quiere decir que en un momento dado hasta 4 esclavos pueden tener la misma dirección si son de diferentes tipos (*word in*, *word out*, *bit in* y *bit out*). Además, un esclavo puede emplear varias direcciones consecutivas si precisa más de un *word* / 2-bits. En función de la configuración escogida en cuanto a tasa de transmisión y número y tipo de nodos se puede variar el tiempo de refresco o duración de cada ciclo TDMA, pudiendo obtenerse, por ejemplo, un tiempo de refresco de 1 ms en una configuración de 64 nodos tipo *word*.

El nivel de enlace proporciona varias funciones adicionales, como notificar al *máster* estados de error en un nodo, proporcionar información de producto (fabricante, configuración, etc.) de los nodos, informar de los nodos que se encuentran conectados a cada repetidor (posibilitando así al *máster* conocer la topología de la red) y ajustar la tasa de transmisión de los esclavos por parte del *máster*.

Una función importante de los repetidores CompoNet es compensar el retraso introducido por estos y adelantar la transmisión de los nodos de su segmento de red, gracias al conocimiento de su posición relativa en la red. Esto posibilita incrementar hasta en tres veces la longitud máxima teórica del bus [45].

El nivel de red/transporte permite el establecimiento de conexiones CompoNet y la fragmentación transparente de paquetes en caso de que estos sobrepasen el tamaño máximo de datos del nivel inferior.

Los mecanismos de acceso al medio implementados por ControlNet son claramente deterministas, al poderse conocer de antemano el momento exacto en el que un nodo podrá transmitir exitosamente en un entorno libre de errores. Por tanto, dicha red será válida para sistemas en tiempo real siempre y cuando la tasa de transferencia de mensajes de la red sea suficiente para el sistema, conocidos el número de nodos de la red, el tamaño de los mensajes de dichos nodos y demás parámetros que puedan influir en dicha tasa de transferencia.

Además, de lo explicado en este apartado se deduce que CompoNet presenta varias ventajas sobre las presentadas anteriormente (DeviceNet, ControlNet), como son la flexibilidad en cuanto a topologías, mayor espacio de direccionamiento, alta tasa de refresco y facilidad y economía de cableado.

4.2.5 EtherNet/IP

EtherNet/IP (*Ethernet Industrial Protocol*) es una implementación del protocolo CIP sobre la pila de protocolos TCP/IP. Se encuentra estandarizado bajo la norma IEC 61784-2, que especifica los perfiles de comunicación para Ethernet en Tiempo Real (RTE, *Real-Time Ethernet*) [31], en concreto bajo el CP 2/2 (*Communication Profile 2/2*).

Es compatible con los estándares Ethernet del IEEE 802.3 (ISO/IEC 8802-3), permitiendo interconectar un número virtualmente ilimitado de dispositivos empleando múltiples esquemas de velocidades de transmisión (100 Mbps, 1Gbps, etc.), medios físicos (cobre, fibra, inalámbrico) y topologías (lineal, en estrella, en árbol, en anillo). [46].

A nivel de red emplea el protocolo IP y a nivel de transporte los protocolos TCP (puerto 44818) y UDP (puerto 2222). TCP proporciona un servicio orientado a la conexión que CIP habitualmente emplea para el intercambio de mensajes explícitos, es decir, conexiones punto a punto que se establecen para soportar transacciones tipo solicitud-respuesta de propósito general y que no precisan de tiempo real (configuración, datos de diagnóstico, etc). No obstante, también puede recurrirse a TCP para el intercambio de mensajes implícitos en tiempo real entre dos dispositivos.

No obstante, para las transacciones en tiempo real (mensajes implícitos, generalmente mensajes de control específicos de la aplicación o *I/O data*), CIP habitualmente recurre al servicio no orientado a la conexión proporcionado por el protocolo UDP. Este protocolo emplea cabeceras reducidas y soporta direccionamiento *multicast*, adecuado para el modelo productor/consumidor de CIP.

Ethernet/IP permite la convivencia de otros protocolos de nivel de red y de aplicación, algo común en las redes de propósito general, como se muestra en la Figura 9. De este modo, la principal ventaja de Ethernet/IP es poder emplear la misma infraestructura de red que emplean la mayoría de las redes de área local (LAN) y de área amplia (WAN) que se pueden encontrar en aplicaciones comerciales en todo el mundo, posibilitando la integración vertical de todos los niveles de la pirámide de automatización industrial a través de una infraestructura de red común, y permitiendo la aplicación de economías de escala.

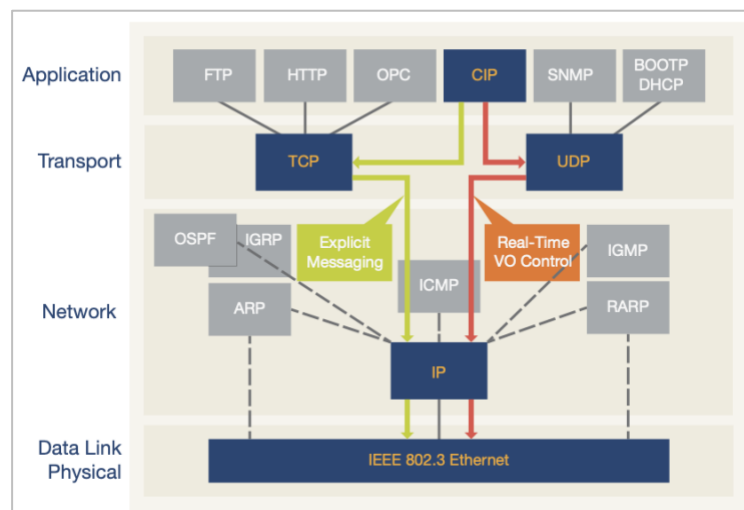


Figura 9 Integración de CIP en una red Ethernet de uso general [46]

Ha de tenerse en cuenta que Ethernet/IP no es una red determinista, pues a nivel de enlace deja en manos de la subcapa MAC el acceso concurrente al medio empleando CSMA/CD, como se explicó en el apartado 3.2.3.

No obstante, el protocolo CIP proporciona ciertas extensiones que, empleadas en el contexto de una configuración adecuada de red, pueden ofrecer una solución apropiada para ciertas aplicaciones críticas en tiempo real. En primer lugar, la extensión CIP Sync ofrece un objeto que proporciona una interfaz para el uso de CIP junto con PTP (*Precision Time Protocol*) según el estándar IEEE 1588 (IEC 61588). De este modo, se puede conseguir una sincronización mejor a 200 ns entre nodos CIP [47]. Mediante el uso de CIP Sync se realiza un marcado temporal de los mensajes CIP (*time stamp*) que permite llevar hacia los dispositivos la responsabilidad de sincronizar sus acciones, en lo que ODVA viene en llamar *Time Synchronized Distributed Control*, tolerando así una mayor relajación en los requisitos de control del *jitter* en la red [48].

Por otro lado, la extensión CIP Motion se centra en control de movimiento y guiado, incluyendo control de torque, velocidad y posición de servos y transmisiones, configuración, monitorización y diagnóstico de motores, comunicación y sincronización de servos para control centralizado o distribuido, etc [48]. Así, el empleo de CIP Sync de manera conjugada con CIP Motion sobre una red EtherNet/IP adecuadamente configurada permite el control coordinado de 100 ejes con una tasa de refresco de 1 ms (en una red Fast Ethernet) [47].

4.3 MODBUS

4.3.1 Protocolo de nivel de aplicación MODBUS

MODBUS es un protocolo de comunicación industrial de nivel de aplicación. Fue desarrollado en 1979 por Modicon (actualmente Schneider Electric) específicamente para sus propios PLC. Fue liberado en 2004 [49] y estandarizado según IEC-61158 (CPF 15). Actualmente, la MODBUS Organization impulsa su empleo y da soporte [50].

El protocolo MODBUS emplea una arquitectura cliente/servidor, y un funcionamiento basado en transacciones petición/respuesta [32]. Cualquier dispositivo MODBUS de todo tipo (PLC, HMI, actuador, sensor, etc.) puede iniciar una transacción, actuando como cliente para iniciar una operación remota sobre un servidor. Dicho servidor devolverá un resultado, respuesta o mensaje de error al cliente que originó la petición.

Las respuestas de los servidores son los resultados de los servicios que dichos servidores ofrecen. Los servicios se distinguen por códigos de función, de modo que los clientes pueden invocar los servicios deseados según dichos códigos, y los servidores pueden identificar las respuestas con los mismos códigos.

Los mensajes MODBUS incluyen 1 byte para identificar el código de función, desde 1 a 255 (el 0 no se puede utilizar). Se distinguen tres categorías de códigos de función:

- Códigos públicos de función: se trata de códigos reservados, definidos y documentados en la especificación del protocolo, para la identificación de servicios concretos.
- Códigos de función definidos por el usuario: existen dos rangos de códigos libres para que los usuarios puedan implementar servicios no incluidos en la especificación del protocolo.
- Códigos de función reservados: utilizados por algunas compañías para mantener la compatibilidad con productos antiguos, pero no están disponibles para el público.

Como se ha explicado, el protocolo Modbus se ubica a nivel de aplicación del modelo OSI. De este modo, cuenta con diversas adaptaciones para su implementación sobre diferentes redes o pilas de protocolos tanto para transmisión serie como Ethernet, tal y como se muestra en la Figura 10.

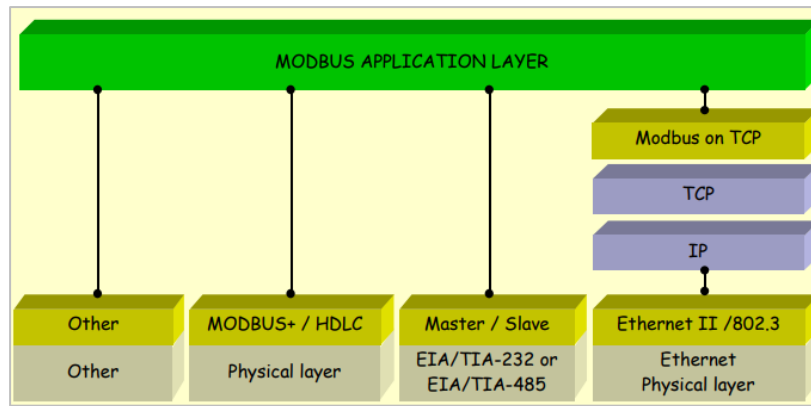


Figura 10 Arquitectura e implementaciones del protocolo MODBUS [32]

La interconexión entre redes MODBUS heterogéneas con diferentes niveles inferiores es posible mediante pasarelas (*gateways*).

El protocolo MODBUS no define mecanismos de seguridad a nivel de aplicación [2]. Carece de autenticación y cifrado, salvo en el caso de la implementación TCP, en la que se ofrece la posibilidad del empleo del protocolo TLS (*Transport Layer Security*) [51]. En las implementaciones serie, existe la posibilidad de invocar comandos mediante transmisión *broadcast*, por lo que es factible la implementación de ataques de denegación de servicio (DoS, *Denial of Service*) que afecten a todos los dispositivos conectados. Además, dado que MODBUS soporta servicios de programación y configuración de elementos de control, es posible inyectar código malicioso en dichos elementos. Para la protección de los sistemas MODBUS se recomienda la monitorización del tráfico, permitiendo únicamente las funciones indispensables. En el caso concreto de emplear MODBUS sobre TCP, se recomienda también la implementación de medidas genéricas como cortafuegos, y sistemas IDS o IPS [2].

En los siguientes subapartados se profundizará en las diversas implementaciones de MODBUS, analizando cómo la integración de este protocolo con distintas tecnologías hará más adecuado el empleo de MODBUS para unas u otras aplicaciones, y especialmente como el aprovechamiento de diversos mecanismos de acceso al medio permitirán o no proporcionar servicios de transmisión deterministas, haciéndolo apropiado para su uso en aplicaciones en tiempo real.

4.3.2 MODBUS Serie

El protocolo MODBUS Serie (MODBUS Serial Line protocol) es una implementación del protocolo de aplicación MODBUS sobre un enlace serie [52].

Soporta redes de hasta 248 nodos, en topología de bus con derivaciones. A nivel físico posibilita la transmisión sobre diversos estándares (EIA/TIA-232-E, EIA/TIA-485-A sobre dos o cuatro cables, etc.), siendo EIA/TIA-485-A (RS485) sobre dos cables balanceados (y un cable común) el interfaz más comúnmente empleado.

Los dispositivos MODBUS serie debe admitir al menos las tasas de transmisión de 9,6 y 19,2 kbps, aunque se pueden implementar otras velocidades soportadas por el estándar de comunicaciones serie empleado, en concreto 1,2, 2,4 y 4,8 kbps, en ambos estándares, y 38,4, 56, 115 kbps, ..., 10 Mbps solo en el caso de RS485. La distancia máxima también vendrá fijada por dicho estándar, siendo inferior a 20 m (según la capacitancia del cable) en el caso de EIA/TIA-232-E, y de hasta 1200 m en el caso de EIA/TIA-485-A.

A nivel de enlace se distinguen dos subcapas: el protocolo maestro/esclavo, y el modo de transmisión.

El protocolo maestro/esclavo se basa en un nodo maestro (*master*) que envía comandos dirigidos a los nodos esclavos (*slaves*), y procesa respuestas procedentes de estos. Los nodos esclavos no se comunican entre ellos, y no transmiten datos salvo que estos hayan sido solicitados por el maestro. El *master* solo inicia una transacción una vez que la transacción anterior ha finalizado. Solo se permite la existencia de un único *master* simultáneamente en la red.

Existen dos tipos de transacciones posibles: *unicast* y *broadcast*. Las transacciones *unicast* constan de una petición originada por el nodo maestro y dirigida a un único *slave* (dirección destino entre 1 y 247), y una respuesta originada por dicho esclavo y destinado al *master*. Las transacciones *broadcast* constan de un único mensaje originado por el nodo maestro y dirigido a todos los *slave* (dirección destino 0). Dicho mensaje consiste en un comando de escritura, que todos los esclavos deben aceptar.

La función de cliente del nivel de aplicación MODBUS es proporcionada por el nodo maestro, mientras que los esclavos actúan como servidores.

En cuanto a la subcapa de modo de transmisión, esta define la manera en la que la información se empaqueta en los campos del mensaje y cómo los bits transmitidos se interpretan, por lo que todos los dispositivos conectados al mismo bus serie MODBUS deben emplear el mismo modo de transmisión. Se distinguen los modos RTU y ASCII. En el modo RTU se transmiten dos caracteres hexadecimales de 4 bits por cada byte del mensaje. Por su parte, en el modo ASCII, cada carácter hexadecimal se codifica en ASCII antes de ser transmitido, de manera que solo se transmite un carácter hexadecimal de 4 bits por cada byte del mensaje.

El modo RTU lo implementan todos los dispositivos MODBUS del mercado, siendo el modo ASCII opcional. No obstante, este último es necesario para ciertas aplicaciones específicas.

El funcionamiento de MODBUS serie permite ofrecer un comportamiento determinista con un cliente (*master*) adecuadamente configurado, y es un

protocolo válido para sistemas en tiempo real siempre que el resto de las propiedades de la red cumplan con los requisitos del sistema.

4.3.3 MODBUS Plus

MODBUS Plus (MODBUS+) es una tecnología *hardware* y *software* propietaria que implementa el protocolo de aplicación MODBUS sobre una red peer-to-peer con paso de testigo (*token passing*) [53].

Soporta hasta 64 nodos (32 nodos sin repetidores) y distancias de hasta 1.800 m (450 m sin repetidores). A nivel físico emplea par de cobre trenzado apantallado. Existe la posibilidad de emplear repetidores sobre fibra óptica, con lo que se pueden alcanzar distancias superiores a los 1.800 m máximos con cable. Admite velocidades de hasta 1 Mbps.

A nivel de enlace, en cada red MODBUS+ existe un *token* (conjunto de bits) que es pasado secuencialmente de nodo a nodo. Cuando un nodo tiene el *token*, dicho nodo puede iniciar transacciones de mensajes con el resto de los nodos, debiendo estar cada mensaje identificado por su dirección origen y destino. El paso del *token* es monitorizado por todos los nodos de la red, y junto con el *token*, un nodo puede enviar información *broadcast* dirigida a todos los nodos. El paso del *token* se realiza en orden creciente de dirección, volviendo a comenzar por el nodo con dirección más baja una vez que ha pasado por todos los nodos. El protocolo soporta cambios en la red, adecuándose dinámicamente a los nodos conectados tanto cuando se desconectan nodos como cuando se conectan nuevos nodos.

Las redes MODBUS+ pueden ser diseñadas con la intención de priorizar velocidad de proceso o bien un comportamiento determinista, en función de la topología escogida y la configuración aplicada a los dispositivos empleados. Por lo tanto, es una tecnología que bajo ciertas condiciones puede ser empleada en sistemas en tiempo real.

4.3.4 MODBUS/TCP

MODBUS/TCP implementa el protocolo MODBUS sobre la pila de protocolos estándar TCP/IP [54]. Se encuentra estandarizado como perfil RTE bajo la norma IEC 61784-2 (CP 15/1).

Es compatible con los diversos estándares Ethernet del IEEE 802.3, por lo que soporta la interconexión de un número virtualmente ilimitado de dispositivos, así como múltiples esquemas de velocidades de transmisión (100 Mbps, 1 Gbps), medios físicos (cobre, fibra, inalámbrico) y topologías (lineal, en estrella, en árbol, en anillo).

A nivel de red emplea el protocolo IP y a nivel de transporte el protocolo TCP, manteniendo siempre escucha sobre el puerto 502. Además, permite el empleo del protocolo seguro TLS para el cifrado de las comunicaciones, en cuyo caso emplea el puerto TCP 802 [51].

MODBUS/TCP permite la coexistencia de múltiples clientes en la misma red. Se establecen conexiones TCP entre cada cliente MODBUS y cada uno de los servidores con los que este deba mantener transacciones, generalmente a razón de una conexión por cada servicio en cada par cliente-servidor. Las conexiones TCP se mantienen abiertas por el tiempo que sea requerido para un número indeterminado de transacciones, pudiendo ser cerradas en cualquier momento por el cliente.

Dado que MODBUS/TCP no modifica ninguno de los niveles inferiores, puede coexistir con otros protocolos y aplicaciones en la misma red. De este modo, al emplear la misma infraestructura de red que utilizan la mayoría de las redes de propósito general comerciales, posibilitan la integración vertical de todos los niveles de la pirámide de automatización industrial a través de una infraestructura de red común, y permitiendo la aplicación de economías de escala.

Por el mismo motivo de emplear TCP/IP y niveles inferiores sin modificar, el comportamiento de MODBUS/TCP no es determinista. Para evitar los intentos de retransmisión tras esperas aleatorias de tiempo implementados en CSMA/CD, se recurre a la conexión física de únicamente un dispositivo por cada puerto de un *switch* (lo que se conoce como una red *switched Ethernet*). De este modo, es el *switch* el único directamente conectado a cada dispositivo. Cuando en el *switch* coinciden transmisiones simultáneas destinadas a un mismo dispositivo, el *switch* transmite una de ellas almacenando el resto, para continuar enviando estas a continuación.

No obstante, el tráfico *broadcast* en la red aumenta la probabilidad de colisiones en el *switch*, mientras que el tráfico de otras aplicaciones compartiendo infraestructura reduce el ancho de banda disponible para las aplicaciones de control. Por ello, se hace necesario la incorporación de *switches* avanzados y una configuración adecuada de la red, de manera que se minimicen los dominios de colisión; se separe en redes diferentes en la medida de lo posible el tráfico en tiempo real del resto de aplicaciones, o bien se priorice o filtre el tráfico; se eviten las tormentas de *broadcast*, y se empleen redes *Ethernet* de alta velocidad (1 Gbit, 10 Gbit). De esta manera, con una planificación adecuada y bajo ciertas condiciones, se puede decir que una red MODBUS/TCP es perfectamente válida como infraestructura de red para un gran abanico de sistemas en tiempo real [55].

4.4 PROFIBUS

PROFIBUS (*PRO*cess *F*ield *BUS*) es un protocolo de comunicación industrial tipo bus de campo desarrollado en 1989 en Alemania. Se trata de un estándar abierto estandarizado bajo las normas IEC 61158 (CPF 3) y EN 50 170 [56].

Soporta redes de hasta 126 estaciones. Implementa los niveles de aplicación, enlace y físico del modelo OSI. A nivel de aplicación distingue entre dispositivos maestros y dispositivos esclavos, pudiendo existir múltiples dispositivos de cada tipo en una misma red. Los dispositivos maestros son estaciones activas, en el sentido de que pueden iniciar peticiones o comandos dirigidos a otras estaciones del sistema. Por su parte, los dispositivos esclavos son estaciones pasivas, en el sentido de que solo transmiten tráfico para confirmar o responder a mensajes enviados por un dispositivo maestro.

A nivel físico se emplean enlaces de par trenzado apantallado RS485, conectando un máximo de 32 estaciones por segmento. A su vez, se pueden emplear hasta un máximo de 9 repetidores para interconectar múltiples segmentos, en una topología de bus o de árbol. Soporta tasas de transmisión desde 9,6 kbps hasta 12 Mbps, en función de la longitud máxima de los segmentos de red, como se muestra en la Tabla 7.

Tasa de transmisión (kbps)	Longitud máx. de segmento (m)
9,6	1.200
19,2	
45,45	
93,75	
187,5	1.000
500	400
1.500	200
3.000	100
6.000	
12.000	

Tabla 7 Longitud máxima del segmento PROFIBUS según el bitrate [57].

Por otro lado, las estaciones se pueden conectar empleando RS-485 a dispositivos específicos denominados OLMs (*Optical Link Modules*), los cuales a su vez se pueden interconectar entre sí empleando fibra óptica, en topología de bus, estrella o anillo [57]. El número de repetidores ópticos posible es ilimitado mientras se tenga en cuenta el retraso de propagación introducido, permitiendo alcances de hasta 100 km [58].

A nivel de enlace emplea el protocolo FDL (*Field bus Data Link*) [59]. Este protocolo cuenta con tres subcapas: FLC, MAC y FMA. La subcapa FLC (*Fieldbus Link Control*) proporciona una interfaz entre el nivel de aplicación y el nivel de enlace [60].

Por su parte, la subcapa MAC (*Medium Access and Control*) es la encargada de la gestión del acceso al medio [59]. Implementa un mecanismo maestro/esclavo con *token passing*. Dado que pueden existir múltiples estaciones maestras en una red PROFIBUS, estas solo pueden acceder al medio si disponen del testigo (*token*). Por su parte, una estación esclava solo transmite en contestación a una petición de una estación maestra.

El testigo se va pasando por la red entre estaciones maestras en orden de dirección creciente, comenzando de nuevo por la dirección más baja una vez que el *token* ha pasado por todas las estaciones maestras. Cuando una estación maestra recibe el *token* por primera vez, activa un temporizador justo antes de pasar el testigo. Las siguientes veces que reciba el testigo, lo primero que hace es completar una transacción (petición/respuesta) catalogada por el nivel de aplicación como de alta prioridad (según la configuración que el usuario haya hecho de los servicios del sistema). Seguidamente compara el temporizador (*Real Rotation Time*, T_{RR}) con un límite máximo de tiempo (*Target Rotation Time*, T_{TR}). En caso de que el temporizador hubiera alcanzado el límite máximo de tiempo, o bien si la estación no tiene nada más que transmitir, la estación reiniciará el temporizador y pasará el testigo. Si por el contrario aún dispone de tiempo, continuará enviando mensajes por orden de prioridad, según la siguiente secuencia [59]:

1. Mensajes de prioridad alta o lista de sondeo (servicios cíclicos).
2. Mensajes de baja prioridad (servicios acíclicos).
3. Comprobación y actualización de que todas las estaciones que figuran en su lista de estaciones maestras activas (*List of Active Stations*, LAS), continúan activas [61].
4. Comprobación de si existe una nueva estación maestra con dirección comprendida entre la dirección propia, y la dirección de la siguiente estación maestra, y en su caso, actualización de la lista que contiene todas las direcciones posibles comprendidas entre ambas estaciones (*Gap List*, GAPL) [61]. Como máximo, comprobará una dirección intermedia por ronda [59].

La Figura 11 muestra un esquema del funcionamiento del protocolo de acceso al medio implementado por FDL.

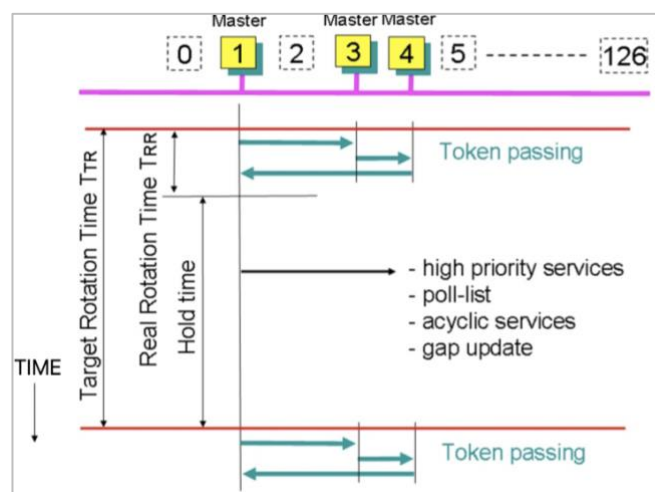


Figura 11 Esquema de funcionamiento de la subcapa MAC de FDL [59]

De este modo, se establece un tiempo máximo tras el cual se garantiza que todas las estaciones maestras podrán transmitir al menos una vez. La desventaja de este mecanismo es que no se establece una ventana temporal garantizada para cada estación, sino que debe recurrirse a priorización de servicios.

Por último, la subcapa FMA1/2 (*Fieldbus Management of layers 1/2*) proporciona funciones para la gestión de los niveles 1 y 2, tanto a nivel local (establecimiento y lectura de valores de variables, informe de eventos de error, etc.) como entre estaciones (interrogación y respuesta sobre qué estaciones están activas, información de versión de *hardware* y *software*, etc.)

Existen tres variantes de PROFIBUS adaptadas a su empleo a diferentes niveles de la pirámide de automatización o entornos [58]:

- PROFIBUS FMS (*Field Message Specification*): modelo orientado a objetos [60], desarrollado para la comunicación entre PLCs de distintos fabricantes [57].
- PROFIBUS DP (*Decentralized Periphery*): al contrario que FMS, implementa un interfaz puro de datos [60], optimizado para comunicación rápida y cíclica con todo tipo de equipos de campo [57].
- PROFIBUS PA (*Process Automation*): extensión de la versión DP optimizada para la monitorización de equipos de medida mediante un sistema de automatización de procesos. Además, permite la transmisión de datos y suministro de alimentación sobre el mismo par apantallado, a una tasa de transmisión máxima de 31,25 kbps y distancia máxima de 1.900 m, empleando el sistema de transmisión MBP (*Manchester Bus Powered*), haciendo posible su empleo en ambientes con atmósfera explosiva [57]

Las tres versiones del protocolo pueden operar sobre el mismo bus simultáneamente, aunque la interconexión entre segmentos PROFIBUS DP y PA requiere de acopladores (*segment coupler*) para adaptar la técnica y velocidad de transmisión y alimentar el segmento PA. La Figura 12 muestra un sistema PROFIBUS jerárquico clásico, empleando las diferentes versiones del protocolo.

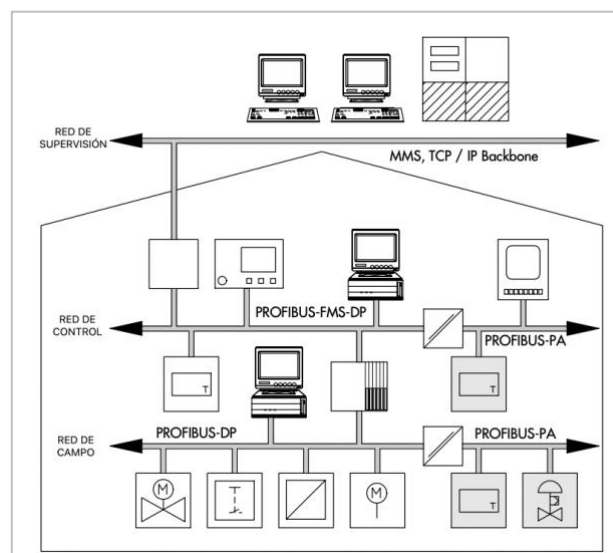


Figura 12 Sistema PROFIBUS jerárquico. Adaptado de [62]

PROFIBUS no implementa ninguna capa de seguridad específica [2]. La falta de autenticación hace de este un protocolo susceptible a ataques de denegación de servicio (DoS) y de inyección de tráfico, por lo que se hace imprescindible una severa seguridad perimetral y un estricto aislamiento lógico estricto del bus del resto de la red.

PROFIBUS fue diseñado para garantizar un comportamiento determinista [63]. En efecto, el mecanismo de acceso al medio implementado por PROFIBUS dota a este protocolo de determinismo, al poder garantizarse ciertas comunicaciones dado un tiempo máximo. No obstante, se requiere un diseño adecuado de la red, así como una configuración estudiada de sus parámetros principales (por ejemplo, el T_{RT} y la priorización de servicios, tal y como se explicó anteriormente) y de los dispositivos conectados, de manera que la red pueda servir a las necesidades del sistema en tiempo real en el que se integre.

4.5 PROFINET

PROFINET es un sistema de comunicación abierto basado en PROFIBUS empleando Ethernet para acceder al medio [64]. Implementa un gran número de características y funciones de aplicación procedentes de PROFIBUS, pero no debe entenderse PROFINET como una mera adaptación de PROFIBUS sobre Ethernet [65].

PROFINET, al igual que PROFIBUS, se encuentra estandarizado bajo el CPF 3 de la norma IEC-61158. Además, al igual que otros protocolos industriales RTE, se encuentra estandarizado bajo la norma IEC 61784-2. (en concreto, CP 3/3, 3/4, 3/5, y 3/6).

Es posible la integración de buses de campo PROFIBUS en redes PROFINET, mediante el empleo de *proxys*. Estos *proxys* presentan un interfaz *master* PROFIBUS y un interfaz de entrada/salida PROFINET (PROFINET IO).

Es compatible con los estándares Ethernet del IEEE 802.3, permitiendo interconectar un número virtualmente ilimitado de dispositivos empleando múltiples esquemas de velocidades de transmisión (100 Mbps, 1Gbps, etc. [66]), medios físicos (cobre, fibra, inalámbrico) y topologías (lineal, en estrella, en árbol, en anillo).

PROFINET permite la convivencia de otros protocolos de nivel de red y de aplicación, posibilitando la integración de los sistemas de operación y de negocio bajo una infraestructura de red común. De hecho, hace uso de diversos protocolos (DHCP, DNS, SNMP, HTTP) para funciones de configuración y mantenimiento [65].

El estándar PROFINET proporciona tres servicios de comunicación diferentes en función de los requisitos de tiempo de respuesta y *jitter*: TCP/IP (o NRT), RT e IRT. Los tres servicios son compatibles en una

misma red, dado que en todos los casos la información es enviada en tramas Ethernet estándar.

La Figura 13 muestra el tiempo de ciclo típico y *jitter* medio resultante en los servicios de comunicación ofrecidos por PROFINET en una red Fast Ethernet (100 Mbps).

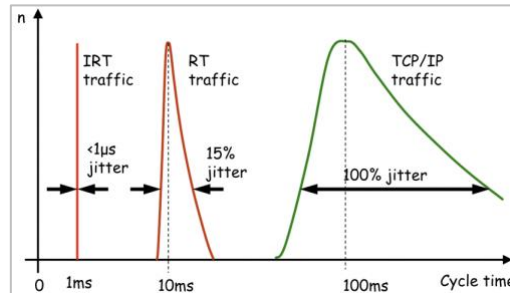


Figura 13 Tiempo de ciclo típicos en los servicios PROFINET [65]

La Figura 14 muestra la pila de protocolos de los tres servicios de PROFINET.

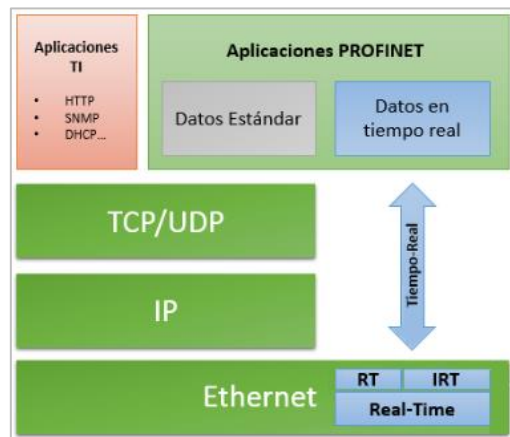


Figura 14 Arquitectura del protocolo PROFINET [64]

El servicio *Standard TCP/IP* o *Non-Real Time* (NRT) es un servicio empleado para la transmisión acíclica e implementación de funciones sin prioridad temporal, como por ejemplo diagnóstico, configuración o envío de datos a las redes IT o de negocio (MES, ERP, etc.). Emplea la pila TCP/IP estándar y ofrece un tiempo de respuesta típico inferior a 100 milisegundos en una red Fast Ethernet.

El servicio *Real Time* (RT) se emplea para la implementación de funciones prioritarias, como procesado cíclico de datos, escalado de alarmas y mensajes críticos y monitorización de la comunicación. Ofrece un tiempo de respuesta típico inferior a 10 milisegundos y *jitter* inferior a 1 ms (en una red Fast Ethernet). Para reducir el retardo, prescinde de las capas TCP/IP (salvo para comunicación RT entre redes, o para comunicación RT *multicast*, en cuyos casos se emplea UDP sobre IP).

El servicio *Isochronous Real Time* (IRT) se emplea para funciones con altos requisitos de sincronización y determinismo. Ofrece un tiempo de

respuesta típico en una red Fast Ethernet inferior a 1 ms (hasta 31,25 μ s) [67] y *jitter* inferior a 1 μ s. El servicio solo puede mantenerse dentro del segmento de red, por lo que es fundamental realizar una segmentación adecuada del sistema [68]. Para garantizar la correcta secuenciación de los datos transmitidos y mantener el *jitter* estrictamente controlado, recurre a priorización de señal y conmutación programada.

Para una sincronización adecuada de los dispositivos, PROFINET implementa un protocolo de sincronización temporal de precisión denominado PTCP (*Precision Transparent Clock Protocol*) basado en el estándar IEEE 1588, con extensiones para determinar y compensar automáticamente el tiempo de propagación y los retrasos introducidos por los conmutadores de la red con precisión de nanosegundo [65] [67].

Para garantizar el servicio IRT con independencia del tráfico RT/NRT existente en la red se requiere *hardware* específico con conmutadores integrados que reemplazan a los *switches* externos, como los circuitos integrados (ASICs) ERTEC (*Enhanced Real-Time Ethernet Controller*) de Siemens [68]. Estos dispositivos implementan una extensión específica de la subcapa MAC de Ethernet de modo que se emplea TDMA durante una parte del tiempo [67], configurable por el usuario. Durante el resto del tiempo disponible, los servicios RT y NRT pueden hacer uso del medio, empleando CSMA/CD, como se muestra en la Figura 15.

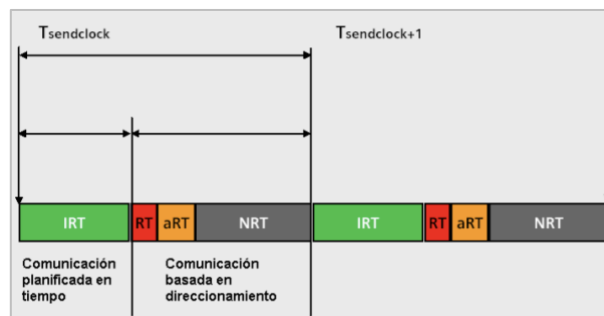


Figura 15 Planificación temporal sincronizada en PROFINET [68]

PROFINET carece de funciones nativas de seguridad, debiendo implementarse medidas de seguridad típicas de sistemas IT tradicionales como cortafuegos, segmentación de la red o establecimiento de zonas desmilitarizadas (DMZ, *DeMilitarized Zone*) [2].

No deben confundirse las funciones de seguridad de la red con las proporcionadas por la extensión PROFI-safe. PROFI-safe es una capa adicional que extiende las funciones de PROFINET para agregar funciones de seguridad funcional de la planta (parada de emergencia, velocidad limitada, etc.) en equipos compatibles, sobre una red estándar PROFINET [65].

Según lo expuesto, el servicio IRT de PROFINET presenta un comportamiento determinista. De este modo, una red PROFINET adecuadamente configurada será capaz de soportar sistemas en tiempo real altamente exigentes. A modo de ejemplo, una red Fast Ethernet con

funcionalidad PROFIBUS IRT soporta el control coordinado de 150 ejes con una tasa de refresco de 1 ms, reservando simultáneamente la mitad del ancho de banda (50 mbps) para tráfico NRT [68].

4.6 POWERLINK

POWERLINK es un sistema de comunicaciones abierto y libre de patentes, orientado a sistemas industriales basado en el empleo de Ethernet y estandarizado bajo las normas IEC 61158 (CPF 13) e IEC 61784-2 (CP 13/1) [69]. Fue presentado al público en 2001 y liberado e incluido como estándar IEC en 2008. En 2017 fue adoptado por el IEEE como único estándar de Ethernet Industrial en tiempo real, en el estándar IEEE 61158 [70].

El desarrollo, estandarización y promoción de POWERLINK corresponde al Grupo de Estandarización de Ethernet POWERLINK (EPSG, *Ethernet POWERLINK Standardization Group*).

POWERLINK es una solución completamente *software* que implementa una capa de aplicación específica, y una capa de nivel de enlace situada justo encima de la subcapa MAC Ethernet. Existe una versión gratuita de código abierto distribuida bajo licencia BSD denominada openPOWERLINK [71]

Es totalmente compatible con los estándares Ethernet del IEEE 802.3 [69]. Por ello, permite interconectar un número virtualmente ilimitado de dispositivos, empleando múltiples esquemas de velocidades de transmisión (100 Mbps, 1Gbps, etc.), medios físicos (cobre, fibra, inalámbrico) y topologías (lineal, en estrella, en árbol, en anillo). Asimismo, permite la coexistencia del protocolo de aplicación POWERLINK con otros protocolos y aplicaciones en la misma red, posibilitando la integración de múltiples sistemas de control y de negocio bajo una infraestructura de red común.

La Figura 16 muestra gráficamente la arquitectura de protocolos de un sistema POWERLINK y su integración con otros protocolos de aplicación.

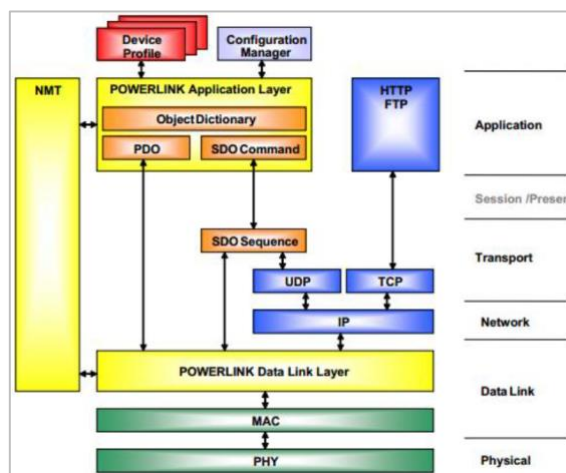


Figura 16 Arquitectura de la pila de protocolos POWERLINK [2]

A nivel de aplicación, POWERLINK implementa el protocolo de aplicación CANopen y un interfaz para el acceso a los niveles inferiores. CANopen es un protocolo de nivel de aplicación orientado a comunicaciones industriales, abierto y normalizado por CiA (CAN in Automation) según los estándares EN 50325-4 e ISO 15745-2 [72]. Fue desarrollado empleando bus CAN en los niveles 1 y 2 de la arquitectura, aunque ha sido adaptado a otras tecnologías de comunicación, como en el caso que nos ocupa.

Este nivel de aplicación sigue un modelo de comunicaciones orientado a objetos. Todos los dispositivos CANopen tienen tres partes: diccionario de objetos (contiene todos los tipos de datos y objetos del equipo), interfaz de comunicaciones (provee servicios de envío y recepción de objetos de comunicación) y aplicación (contiene la funcionalidad de control del equipo). Existen tres tipos de objetos de comunicación, los cuales proporcionan acceso a tres servicios de comunicación diferentes [73]:

- *Process Data Object* (PDO): Permiten acceder a un servicio productor/consumidor. En este servicio, los productores realizan el envío síncrono *broadcast* de mensajes prioritarios y de mensajes urgentes de actualización de estado, que son leídos por ciertos dispositivos (consumidores) que requieren interpretar dichos mensajes y actuar en consecuencia. Un mensaje PDO contiene hasta 8 bytes de datos de aplicación (*payload*).
- *Service Data Object* (SDO): Permiten acceder a un servicio cliente/servidor, mediante el cual un dispositivo cliente (típicamente un dispositivo controlador) puede solicitar la lectura o escritura de una cantidad indeterminada de datos de/en el diccionario de objetos de un servidor remoto (típicamente un dispositivo de campo), devolviendo este último siempre una respuesta o confirmación.
- *Network Management* (NMT): Permiten acceder a un protocolo maestro/esclavo para la gestión y supervisión de la red. Todos los dispositivos CANopen deben implementar una máquina de estados NMT esclava, consistente en cuatro estados: Inicialización, Pre-operativo, Operativo y Paro. Cuando un dispositivo arranca entra en estado de Inicialización, durante el cual todos sus parámetros son inicializados con los valores predefinidos. Cuando la inicialización del dispositivo concluye, pasa a estado Pre-operativo, durante el cual puede comunicarse mediante los protocolos SDO y NMT. En el estado Operativo un nodo puede utilizar los tres objetos de comunicaciones, y en el estado Parado solamente puede comunicarse mediante el protocolo NMT. Por otro lado, ciertos dispositivos pueden implementar el protocolo NMT maestro. Si un dispositivo actúa como NMT maestro en la red, puede cambiar el estado de cualquier dispositivo conectado a la red que haya sido previamente inicializado. Los mensajes NMT tienen la máxima prioridad posible en la red.

El funcionamiento del mecanismo de acceso al medio implementado por la capa de nivel 2 de POWERLINK se basa en una combinación de sondeo (*polling*) y asignación de *slots* temporales de manera cíclica. Para

la sincronización de los dispositivos y control de la comunicación en una red POWERLINK, un nodo cualquiera asume el rol de *managing node* (MN) mientras que el resto de los nodos asumen el de *controlled nodes* (CN).

El acceso al medio sigue un esquema cíclico con dos fases en cada ciclo: fase isócrona y fase asíncrona. Cada ciclo comienza con el MN enviando un mensaje denominado *Start of Cycle* (SoC) con el fin de sincronizar a todos los nodos, tras lo cual comienza la fase isócrona.

Durante la fase isócrona, el MN “sondea” a cada CN mediante un mensaje *PollRequest*, invitándolos a transmitir. El mensaje *PollRequest* además transporta información procedente del MN y destinada al CN sondeado. Tras la recepción de este mensaje, el CN en cuestión envía la información que tenga que enviar al resto de nodos, empleando mensajes *PollResponse*. En función de las necesidades de ancho de banda de cada dispositivo, el MN puede asignar turnos de comunicación a todos los CN en cada ciclo, o bien puede que algunos CN sean sondeados solamente cada cierto número de ciclos. Esta técnica es conocida como multiplexación, ya que un mismo *time slot* puede ser ocupado por diferentes dispositivos en ciclos sucesivos.

Finalmente, la fase asíncrona es iniciada por el MN mediante el envío de un mensaje *Start of Async* (SoA). Durante esta fase se produce un intercambio de información que no precisa tiempo real (mensajes TCP/IP, parámetros de configuración, etc). También en esta fase, los nuevos dispositivos que se conectan a la red se identifican ante el MN, de modo que este pueda tenerlos en cuenta como nuevos CN en ciclos sucesivos.

La Figura 17 muestra el esquema de sincronización de POWERLINK:

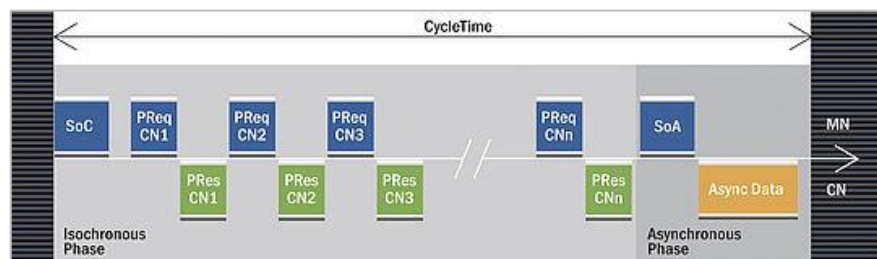


Figura 17 Fases de la comunicación en una red POWERLINK [69]

POWERLINK carece de mecanismos de seguridad que permitan garantizar la autenticidad de los mensajes, por lo que es posible falsificar el tráfico de cualquier nodo, MN o CN [2]. Además, la información no viaja cifrada, por lo que cualquier nodo con acceso a la red será capaz de obtener la información de cualquier CN. Por otro lado, aunque en teoría un CN solo debe transmitir cuando se le solicita, nada impide a un nodo malintencionado inundar de tráfico la red, por lo que es relativamente sencillo provocar un ataque de DoS. Por estas razones, se hace imprescindible garantizar una estricta seguridad perimetral que aísle el tráfico de esta red.

Enlazando con lo anterior, hay que tener en cuenta que una de las ventajas de POWERLINK es precisamente su compatibilidad con sistemas que empleen la pila de protocolos TCP/IP estándar, lo que permite el acceso a la red por parte de sistemas TI genéricos que no implementen la pila POWERLINK. Con el fin de garantizar un comportamiento determinista que soporte un sistema en tiempo real, a la vez que se permite el acceso sincronizado de sistemas TI genéricos a la red de control, deberán emplearse pasarelas (*gateways*) que implementen la pila POWERLINK en el interfaz conectado a la red POWERLINK y la pila TCP/IP estándar en el interfaz conectado a la red TI. Estas pasarelas se encargarán de dejar pasar el tráfico TCP/IP estándar solamente en la fase de transferencia asíncrona.

Un ejemplo ilustrativo del buen desempeño de una red POWERLINK en un sistema en tiempo real es el sistema implementado por el fabricante Brückner Maschinenbau GmbH para procesamiento de plástico, que controla de manera sincronizada 728 ejes con una tasa de refresco de 400 μ s y un *jitter* inferior a 1 μ s [69].

4.7 EtherCAT

EtherCAT (*Ethernet for Control Automation Technology*) es un sistema de comunicaciones abierto orientado a sistemas industriales basado en el empleo de Ethernet y estandarizado bajo las normas IEC 61158 (CPF 12) e IEC 61784-2 (CP 12/1 y CP 12/2) [74]. Fue presentado al público en 2003 e incluido como estándar IEC en 2007. Su desarrollo, estandarización y promoción corresponde al *EtherCAT Technology Group* (ETG), la organización de bus de campo con mayor número de miembros en el mundo (más de 4.000).

Las redes EtherCAT permiten la conexión de hasta 65.535 dispositivos en la misma red, empleando múltiples topologías (lineal, en estrella, en árbol, en anillo, y combinaciones de las anteriores), a distancias de hasta 100 m sobre cable Ethernet (distancias mayores si se emplea fibra óptica). Soportan velocidades de 100 Mbps, 1 Gbps (EtherCAT G) y 10 Gbps (EtherCAT 10G) [75].

EtherCAT implementa específicamente los niveles 2 (enlace) y 7 (aplicación) del modelo OSI. A nivel físico emplea los estándares del IEEE 802.3, y a nivel de enlace, emplea el mismo formato de trama. No obstante, existen diferencias a nivel de enlace con respecto al protocolo Ethernet.

Dicha diferencia a nivel de enlace es debido a que EtherCAT se desarrolló pensando en las características típicas de sistemas industriales, en los cuales pueden existir un gran número de dispositivos que deben acceder a la red de manera muy frecuente, pero con muy poca cantidad de datos. Así, suponiendo una trama Ethernet estándar del tamaño más pequeño posible (84 bytes incluyendo el *interframe gap*) para dispositivos que solo

requieran transmitir 4 bytes de datos por ciclo, se tendría una eficiencia del 4,76% empleando Ethernet.

Para mejorar el rendimiento de la red, EtherCAT distingue dos tipos de dispositivos: maestros y esclavos. Los nodos maestros implementan el nivel 2 estándar de Ethernet, y son los únicos capaces de generar tramas Ethernet. Por su parte, los nodos esclavos implementan un nivel de enlace específico. No pueden generar tramas Ethernet propias, sino que leen y procesan la porción de datos (datagrama EtherCAT) dirigida a ellos de entre los incluidos en la trama, modifican la trama para enviar información dirigida a cualquier nodo (maestro o esclavo), y reenvían dicha trama “aguas abajo” al siguiente nodo del segmento. El último nodo del segmento reenvía la trama al nodo maestro, que procesa la información generada por los esclavos dirigida a él. A continuación, el nodo maestro podrá poner en circulación la misma trama (modificada o no) en caso de que algún esclavo tuviera información para otro esclavo “aguas arriba”. Este sistema permite la comunicación maestro-esclavo, pero también esclavo-esclavo e incluso maestro-maestro.

Se calcula que la velocidad efectiva del datagrama EtherCAT puede llegar a aumentar de esta manera hasta más del 90%, reduciéndose el ancho de banda necesario para la transmisión de un gran número de dispositivos con una alta tasa de refresco y eliminando la necesidad de conmutadores. Se considera el sistema más rápido disponible actualmente para envío de pequeñas cantidades de datos (*payload*) [74], habiéndose demostrado tiempos de ciclo de 12,5 μ s en una red con un PC estándar y 15 dispositivos esclavos [76].

Durante el arranque, el nodo maestro configura los nodos esclavos, asignándoles una o más direcciones EtherCAT, pudiendo asignar direcciones repetidas a varios nodos con el fin de posibilitar el envío de datagramas EtherCAT *multicast*.

La implementación de los dispositivos maestros no requiere de ningún tipo de *hardware* especial, sino que son implementados mediante *software* incluyendo *hardware* Ethernet estándar. Por su parte, la implementación de dispositivos esclavos requiere de un *hardware* en forma de chip denominado controlador de esclavo (ESC, *EtherCAT Slave Controller*) para procesar las tramas Ethernet, con el fin de mantener un comportamiento totalmente predecible de la red independientemente de la implementación del esclavo.

EtherCAT no está exenta de patentes [77]. Las licencias para la implementación de dispositivos tanto maestros como esclavos son gratuitas, pero no lo son las licencias para la implementación de chips ESC. En la actualidad existen implementaciones de este tipo de chips fabricadas por trece proveedores diferentes. En cuanto al *software*, existen implementaciones propietarias y también de código abierto [78].

En cuanto a la integración de EtherCAT con otros protocolos, el nivel de aplicación EtherCAT contempla la implementación de un protocolo denominado “de buzón de correo” (*Mailbox*) con múltiples perfiles, gracias a los cuales es posible la transmisión cíclica o acíclica de otros tantos protocolos, como se muestra en la Figura 18. Así, el perfil EoE (*Ethernet over EtherCAT*) permite integrar datos de protocolos de aplicación genéricos sobre TCP/IP incluso con su propia trama Ethernet, todo ello encapsulado en paquetes de datos EtherCAT, sin afectar a la capacidad de tiempo real de la red, posibilitando así la integración de sistemas de control y de negocio bajo una infraestructura de red común. Del mismo modo, existen otros perfiles como CoE (*CAN application protocol over EtherCAT*), SoE (*SERCOS over EtherCAT*), FoE (*File Access over EtherCAT*) y AoE (*Automation Device Protocol over EtherCAT*). Evidentemente, no todos los clientes deben implementar *Mailbox* con todos los perfiles, sino que cada cliente implementará los protocolos que requiera.

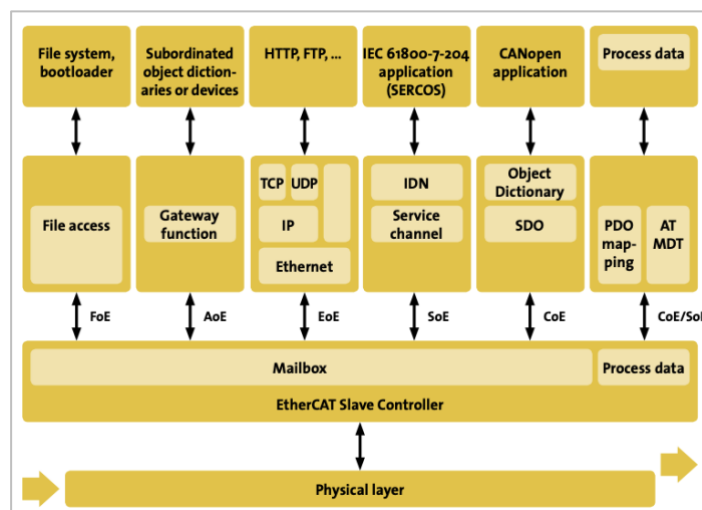


Figura 18 Integración de múltiples protocolos sobre EtherCAT [74]

EtherCAT carece de mecanismos de autenticación y de cifrado [2], por lo que es sencillo para cualquier dispositivo con acceso a la red la obtención de información potencialmente sensible. Además, esto hace posible la falsificación de la información mediante ataques de intermediario (MitM, *Man-in-the-Middle*). Por último, los ataques de DoS también son un riesgo, debido a la posibilidad de que se inyecte tráfico en la red que interfiera con la sincronización. Se hace pues imprescindible garantizar una estricta seguridad perimetral que aisle el tráfico de la red EtherCAT del resto de sistemas. También es recomendable la monitorización del tráfico en la red con el fin de detectar cualquier inyección de tráfico por parte de nodos no autorizados. En caso de ser necesario el acceso por parte de aplicaciones genéricas a la red EtherCAT, deberán implementarse nodos esclavos que implementen *Mailbox* con los perfiles requeridos, de modo que actúen como *gateway* para el acceso controlado y sincronizado a la red.

No deben confundirse las funciones de seguridad de la red con las proporcionadas por la extensión FSoE (*Functional Safety over EtherCAT*). FSoE agrega a EtherCAT funciones de seguridad funcional (parada de

emergencia, velocidad limitada, etc.), tanto centralizada como descentralizada.

En conclusión, EtherCAT es una red capaz de ofrecer un comportamiento altamente determinista para sistemas industriales en tiempo real con un gran número de dispositivos, garantizando además una adecuada integración de la red de control con los sistemas de negocio. A modo de ejemplo, EtherCAT permite la coordinación de 100 ejes con una tasa de refresco de 100 μ s con un *jitter* inferior a 1 μ s (en una red Fast Ethernet) [79].

4.8 SERCOS

SERCOS (*SE*rial *Re*altime *CO*munications *S*ystem) es un bus de comunicaciones serie orientado a dispositivos industriales en tiempo real. Fue creado en la década de 1980 por las asociaciones alemanas ZVEI (*Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie*, Asociación Central de Industrias Eléctricas y Electrónicas) y VDW (*Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken*, Asociación Alemana de Fabricantes de Maquina-Herramienta) [80].

En la actualidad su aceptación mundial se debe no solo a su faceta de sistema de comunicaciones RT, sino que además establece de manera estandarizada más de 700 parámetros de descripción e interacción con dispositivos electrónicos, neumáticos e hidráulicos.

Existen tres generaciones del protocolo: SERCOS I, II y III, estandarizadas bajo la norma IEC 61158 (CPF 16). En concreto, SERCOS I y II se corresponden con los perfiles CP 16/1 y CP 16/2 del IEC 61784-1, mientras que SERCOS III está estandarizado como RTE del IEC 61784-2 (CP 16/3).

Las tres versiones del protocolo SERCOS ofrecen un comportamiento determinista con un tiempo de ciclo configurable (mínimo 62,5 μ s en SERCOS I y II, 31,25 μ s en SERCOS III) y un *jitter* inferior a 1 μ s.

Se trata de un protocolo de comunicaciones maestro/esclavo. En cada ciclo de la comunicación, de duración configurable en múltiplos del tiempo de ciclo mínimo, se dan tres tipos de mensajes:

- MST (*Master Synchronisation Telegram*): Mensaje mediante el cual el *master* establece el reloj del sistema, permitiendo la sincronización de todos los nodos.
- AT (*Amplifier drive Telegram*): Respuesta de un esclavo al MST.
- MDT (*Master Data Telegram*): Transporta datos destinados a u originados por nodos esclavos.

Todos los nodos tienen dos puertos de comunicaciones, y solo el nodo maestro puede iniciar un mensaje. Cuando el mensaje llega al primer esclavo de la red, este comprueba los datos contenidos en el mensaje que

van dirigidos a él y los procesa “al vuelo”, escribiendo de nuevo en el mensaje en caso de que tenga datos que enviar y reenviando el mensaje al siguiente nodo por el segundo puerto de comunicaciones. El último nodo esclavo de la red reenvía finalmente el mensaje de vuelta al nodo maestro, bien a través de su propio puerto secundario (topología en anillo), o siguiendo el camino original a la inversa (topología lineal). El sistema de procesamiento de comunicaciones “al vuelo” se implementa sobre *hardware* dedicado, de modo que el retraso en cada nodo está perfectamente controlado.

La Figura 19 muestra este esquema de comunicación.

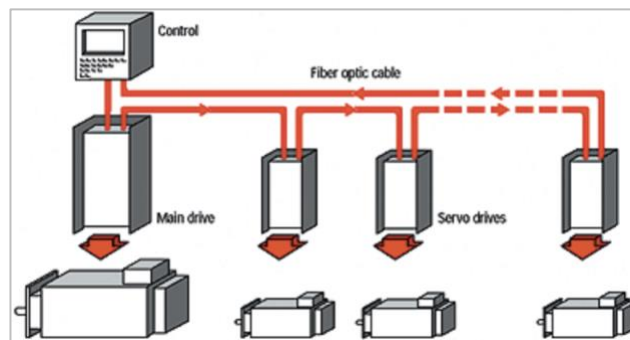


Figura 19 Topología en anillo en una red SERCOS I/II [81]

4.8.1 SERCOS I / II

La primera generación, SERCOS I, data de 1987. Actualmente se considera obsoleta [80].

Emplea fibra óptica como medio, con modos de transmisión a 2 y 4 Mbps en topología de anillo. El procesamiento de comunicaciones lo realiza un ASIC modelo Sercon410B que ya no se fabrica.

La segunda generación, SERCOS II, data de 1999, y se distingue de SERCOS I en que implementa dos velocidades de transmisión adicionales, de 8 y 16 Mbps, empleando el ASIC Sercon816.

A nivel de enlace emplean el protocolo HDLC.

Ambas versiones del protocolo soportan un maestro y hasta 254 esclavos por anillo, pudiendo interconectarse múltiples anillos.

A modo de ejemplo, SERCOS II a 16 Mbps permite la coordinación de 100 ejes con una tasa de refresco de 2,5 ms (20 ejes con tasa de refresco de 0,5 ms) y un *jitter* inferior a 1 μ s [81], como se muestra en la Figura 20.

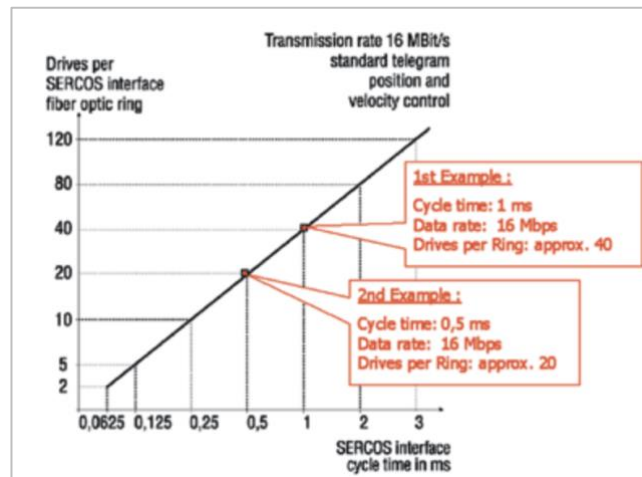


Figura 20 Desempeño de una red SERCOS II a 16 Mbps [81]

4.8.2 SERCOS III

La tercera generación, SERCOS III, data de 2005. Implementa el protocolo SERCOS II sobre *hardware* Ethernet estándar, y es compatible con las versiones anteriores en cuanto a estructura de los mensajes, perfiles y sincronización.

Emplea el nivel físico de los estándares IEEE 802.3, a 100 Mbps, con topología lineal o en anillo. Recurre a un FPGA (*Field-Programmable Gate Array*, Matriz de Puertas Lógicas Programable) o ASIC para procesar el tráfico [80].

Soporta un único maestro por anillo o segmento, y hasta 511 esclavos por anillo o segmento.

A nivel de enlace emplea el formato de tramas Ethernet. El acceso al medio en SERCOS se basa en la división de cada ciclo de comunicación en dos fases o canales TDMA: un canal RT (*Real-Time*) y un canal UCC (*Unified Communication Channel*). Durante la fase RT, se emplea el método de acceso al medio descrito anteriormente, en el cual el nodo maestro envía una trama *broadcast* al medio, y esta se va reenviando de nodo en nodo (modificada o no) hasta volver al nodo maestro. Por otro lado, durante la fase UCC se permite el acceso asíncrono (CSMA/CD) al medio por parte de todos los nodos. Esto posibilita la coexistencia de otros protocolos Ethernet, como TCP/IP y UDP/IP, a través de *gateways* SERCOS III, posibilitando la integración de múltiples sistemas de control y TI genéricos bajo una infraestructura de red común sin afectar el comportamiento determinista de la red.

Al igual que otros protocolos presentados basados en Ethernet, SERCOS III carece de mecanismos de autenticación y de cifrado, por lo que deberá garantizarse una adecuada seguridad perimetral y monitorización del tráfico en la red.

4.9 Resumen y conclusiones

A lo largo de este capítulo se han analizado algunas de las tecnologías de bus de campo y de Ethernet industrial con mayor peso actualmente, presentando las técnicas empleadas por dichas tecnologías para garantizar el servicio en tiempo real.

Se ha comprobado cómo **los buses de campo implementan protocolos diseñados desde su concepción con el objetivo de ofrecer un acceso al medio de manera sincronizada y controlada**, que permita la comunicación de los datos críticos dentro de unos márgenes de tiempo limitados y estables. Por ello, todas las tecnologías de bus de campo analizadas implementan esta función de manera nativa a nivel de enlace, excepto uno de los casos (DeviceNet), en los cuales se implementa esta función a nivel de aplicación por reutilizar un protocolo de nivel de enlace limitado.

Por otro lado, se ha analizado cómo **las redes industriales basadas en Ethernet recurren al modelo TCP/IP tradicional con adaptaciones** con el fin de garantizar la validez de la red en sistemas en tiempo real, excepto una de las tecnologías analizadas, que deja esta responsabilidad totalmente en manos de un buen diseño e implementación de una red *switched Ethernet*.

Entre las modificaciones incorporadas frecuentemente en las redes de Ethernet industrial, destaca en primer lugar que **prescinden de los protocolos de nivel de transporte y de red** para ofrecer un servicio en tiempo real. A pesar de ello, prácticamente todas las tecnologías de Ethernet industrial soportan un servicio adicional de tráfico asíncrono sobre TCP/UDP/IP (entre otros protocolos) sin menoscabo del servicio RT.

Asimismo, **las redes de Ethernet industrial suelen implementar mecanismos de acceso al medio capaces de ofrecer un comportamiento determinista**, como si fueran buses de campo. En este sentido, se han analizado diversas maneras de evitar el factor de aleatoriedad en el acceso al medio introducido por el nivel de enlace de Ethernet estándar. Entre los métodos presentados se distinguen aquellos basados únicamente en **software** (bien con mecanismos implementados a nivel de aplicación, o bien en una subcapa adicional a nivel de enlace) y que son totalmente **compatibles con el hardware Ethernet estándar**; y aquellos métodos basados en una combinación de **hardware y software** y que directamente modifican (en lugar de complementar) el protocolo Ethernet estándar.

En cuanto a las técnicas empleadas para controlar el acceso al medio, tanto en protocolos de bus de campo como de Ethernet industrial, se han analizado técnicas basadas bien en una **distribución del tiempo** durante el cual el medio queda reservado para cada estación (TDMA y variantes), o bien basadas en algún mecanismo de **paso y/o concesión de turno**

(paso de testigo, sondeo, etc.), con diferentes variaciones o combinaciones de dichas técnicas. Generalmente, emplean una **arquitectura maestro/esclavo** en la que uno o varios nodos se encargan de la sincronización y coordinación de todas las comunicaciones en la red.

Como se explicó al inicio del capítulo, la tendencia actual es a dejar de lado la integración de dispositivos basados en bus de campo, en beneficio de dispositivos basados en **Ethernet industrial**. Esta tendencia se justifica por las siguientes causas:

- Necesidad de implementar redes con un **gran número de dispositivos**.
- Necesidad de **acceder de manera remota** a los dispositivos industriales.
- Necesidad de mayor **ancho de banda**.
- Ventajas de emplear **hardware económico**, común y estándar.
- Ventajas de emplear el **mismo tipo de red** para IT y para OT.

A modo de resumen de las tecnologías analizadas en este capítulo se incluye a continuación la Tabla 8, que muestra una comparativa entre dichas tecnologías de acuerdo con sus características principales presentadas anteriormente. Se ha añadido el dato “fabricante principal”, cuyas fuentes principales han sido [1] y [31].

Como reflexión final, dada la tendencia del mercado y de la industria hacia una mayor conectividad basada en Ethernet Industrial, y dado el gran número de diferentes tecnologías en este ámbito, cada una de las cuales con sus propias soluciones adaptadas al problema que pretenden resolver y apoyadas por diferentes actores, se hace necesaria la adopción de un estándar común, ampliamente reconocido, y que resuelva de manera global las diversas problemáticas aquí planteadas. Ante esta situación, el IEEE (*Institute of Electronics and Electrical Engineers*) se propone la estandarización de las redes sensibles al tiempo (TSN, *Time Sensitive Networking*), centrándose principalmente en las capas física y de enlace del modelo, y asignándole este cometido al subgrupo de trabajo TSN del IEEE 802.1, como se verá en el Capítulo 5. Asimismo, el IETF (*Internet Engineering Task Force*) ha formado el equipo de trabajo DETNET (*DETerministic NETwork*) para centrarse en la estandarización del nivel de red y superiores, cuyo análisis queda fuera del objetivo de este TFM.

Red	Tipo	Principal fabricante	Determinismo	Topología	Medio físico	Tasas de transmisión	Distancia máxima	Tipo de comunicación (aplicación)	Nº máx. dispositivos
DeviceNet	Bus de campo	Rockwell Automation	Sí	Bus con derivaciones	Par de cobre	125 kbps 250 kbps 500 kbps	500 m 250 m 100 m	Productor - Consumidor (CIP)	64
ControlNet	Bus de campo	Rockwell Automation	Sí	Bus con derivaciones / Anillo / Estrella / Árbol	Coaxial	5 Mbps	1000 m 500 m 250 m (20 km con repetidores)		2 32 48 (99 con repetidores)
					Fibra		20 km		99
CompoNet	Bus de campo	Omron Electronics	Sí	Bus con derivaciones (3 niveles en total)	Par trenzado / cable plano	93,75 kbps 1,5 Mbps 3 Mbps 4 Mbps	500 m 100 m 30 m 30 m		384
EtherNet/IP	Ethernet industrial	Rockwell Automation	No	Bus / Estrella / Árbol / Anillo / Combinaciones de las anteriores	Par de cobre / Fibra	100 Mbps 1 Gbps 10 Gbps	Depende del medio y nº segmentos (IEEE 802.3)	Cliente – Servidor	Virtualmente ilimitados
MODBUS serie	Bus de campo	Schneider Electric	Sí	Bus con derivaciones	Par de cobre (RS232)	19,2 kbps	20 m		248
					Par de cobre (RS485)	9,6 kbps ... 10 Mbps	1000 m ... 12 m		
MODBUS+	Bus de campo	Schneider Electric	Sí	Token Ring	Par trenzado	1 Mbps	450 m (hasta 1.800 m con repetidores, y más con fibra óptica)	Cliente – Servidor	64
MODBUS TCP	Ethernet industrial	Schneider Electric	No	Bus / Estrella / Árbol / Anillo / Combinaciones de las anteriores	Par de cobre / Fibra	100 Mbps 1Gbps 10 Gbps	Depende del medio y nº segmentos (IEEE 802.3)	Cliente – Servidor	Virtualmente ilimitados
PROFIBUS DP	Bus de campo	Siemens	Sí	Bus / Árbol	Par de cobre (RS485)	9,6 kbps ... 12 Mbps	1200 m .. 100 m	Maestro – Esclavo	126
					Fibra		100 km		

PROFIBUS PA	Bus de campo	Siemens	Sí	Bus / Árbol	Par de cobre (RS485)	31,25 kbps	1900 m		32 (126 con repetidores)
PROFINET	Ethernet industrial	Siemens	Sí	Bus / Estrella / Árbol / Anillo / Combinaciones de las anteriores	Par de cobre / Fibra	100 Mbps 1Gbps 10 Gbps	Depende del medio y nº segmentos (IEEE 802.3)	Productor - Consumidor	Virtualmente ilimitados
POWERLINK	Ethernet industrial	B&R Industrial Automation	Sí	Bus / Estrella / Árbol / Anillo / Combinaciones de las anteriores	Par de cobre / Fibra	100 Mbps 1Gbps 10 Gbps	Depende del medio y nº segmentos (IEEE 802.3)	Productor - Consumidor (PDO) / Cliente – Servidor (SDO) / Maestro – Esclavo (NMT)	Virtualmente ilimitados
EtherCAT	Ethernet industrial	Beckhoff	Sí	Bus / Estrella / Árbol / Anillo / Combinaciones de las anteriores	Par de cobre / Fibra	100 Mbps 1Gbps 10 Gbps	100 m (en caso de fibra óptica más. Depende del tipo)	Maestro – Esclavo / Esclavo – Esclavo / Maestro – Maestro	65.535
SERCOS I	Bus de campo	Bosch Rexroth	Sí	Anillo	Fibra	2 Mbps 4 Mbps	50 m (fibra óptica plástica) / 250 m (fibra óptica de vidrio)	Maestro - Esclavo	255
SERCOS II						2 Mbps 4 Mbps 8 Mbps 16 Mbps			
SERCOS III	Ethernet industrial	Bosch Rexroth	Sí	Anillo / Bus	Par de cobre / Fibra	100 Mbps	Depende del medio y nº segmentos (IEEE 802.3)	Maestro – Esclavo / Esclavo – Esclavo / Maestro – Maestro	512

Tabla 8 Cuadro comparativo entre las redes industriales analizadas

5 Estándares del IEEE 802.1TSN

5.1 Introducción

5.1.1 Necesidad de las TSN

Como se expuso en el Capítulo 4 , en lo referente a las tecnologías de automatización industrial existe una clara tendencia a una cada vez mayor conectividad basada en Ethernet, debido a las ventajas ofrecidas por estas redes en el actual cambio de paradigma hacia la Industria 4.0. En este escenario, las redes deben ofrecer las siguientes capacidades:

- Permitir la interconexión de una gran cantidad de dispositivos.
- Ofrecer capacidad de comunicación en tiempo real fiable.
- Ofrecer alto ancho de banda.
- Garantizar la compatibilidad con el *hardware* Ethernet existente.
- Permitir la transmisión de tráfico no prioritario y en tiempo no real (NRT), sin afectar al tráfico crítico en tiempo real (RT), y optimizando el ancho de banda.

Debido a que las redes Ethernet estándar no implementan mecanismos de sincronización, calidad de servicio (QoS) ni reserva de ancho de banda [6], ni pueden asegurar unos valores limitados de latencia ni *jitter*, aparecen numerosas tecnologías que implementan distintas soluciones para resolver alguna o varias de las carencias de Ethernet en este sentido.

En el Capítulo anterior se analizaron algunas de estas soluciones que, si bien están basadas en Ethernet, modifican ciertos aspectos de dicho estándar. En este sentido se plantean desde simples optimizaciones de la pila de protocolos estándar hasta sustituciones de los mecanismos de acceso al medio implementados sobre *hardware* específico, pasando por extensiones *software* de los protocolos estándar. Cada una de estas tecnologías está respaldada por unos u otros fabricantes, organizaciones y/o asociaciones, que impulsan y promueven su empleo.

Ante esta situación, se hace necesaria la adopción de un estándar común, ampliamente reconocido, y que resuelva de manera global las diversas problemáticas planteadas, al tiempo que garantice la interoperabilidad de los dispositivos de los distintos fabricantes. Esto permitirá avanzar hacia la convergencia de múltiples servicios de comunicaciones en una red común, ofreciendo múltiples ventajas sobre los sistemas actuales: reducir los costes de instalación, mantenimiento y operación; reducir el tiempo de mantenimiento y recuperación ante fallos, aumentando así la disponibilidad del sistema; reducir el número y tamaño de dispositivos, etc.

En este contexto, los estándares TSN (*Time-Sensitive Networking*) del IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) tienen por propósito establecer una estandarización de las redes sensibles al tiempo, de manera que estas sirvan de capa de conectividad unificada, permitiendo la convergencia, tanto mediante la interconexión de múltiples

redes con diversas tecnologías (empleando para ello *gateways*) como mediante la conexión de múltiples dominios de aplicación directamente a la red, reemplazando todos los buses y redes alternativas. Asimismo, se busca que esta red unificada cubra los requerimientos no solo de los sistemas de automatización industrial expuestos al inicio de este apartado, sino también de otros sistemas en tiempo real con requerimientos de servicio determinista (*fronthaul*, audio y vídeo, *infoentretenimiento*, etc.), en muchos casos coincidentes con los planteados por la Industria 4.0, como son el transporte de datos garantizado, con retardo limitado, bajo, y con pequeñas variaciones (*jitter*), y sin ninguna pérdida de paquetes por congestión [82].

5.1.2 El IEEE 802.1 y el subgrupo de trabajo TSN

El IEEE 802 *LAN/MAN Standards Committee*, también conocido como el LMSC o simplemente el IEEE 802, es el área del IEEE que tiene por objetivo desarrollar estándares relacionados con redes de área local (LAN) y metropolitana (MAN), principalmente focalizados en los niveles 1 (físico) y 2 (enlace) del modelo OSI [82].

El IEEE 802 tiene a fecha de finalización de este TFM siete grupos de trabajo o estudio (WG, *Working Group*) abiertos, además de tres grupos en hibernación y diecinueve grupos ya disueltos [83], de los cuales han surgido o se encuentran en curso numerosos estándares internacionales ISO (*International Organization for Standardization*) e IEC (*International Electrotechnical Commission*) [84].

De los siete grupos de trabajo abiertos, el IEEE 802.1 WG es el encargado del estudio y desarrollo de estándares relativos a protocolos situados por encima de las subcapas MAC y LLC del nivel de enlace en redes LAN y MAN. Esto incluye áreas como arquitectura; interconexión de redes LAN, MAN y otras redes de área amplia; seguridad; y gestión de red [85].

A su vez, el IEEE 802.1 WG tiene abiertos, a fecha de finalización de este TFM, tres grupos de trabajo en tareas específicas (TG, *Task Groups*), así como cuatro TG desactivados. Los TG del IEEE 802.1 actualmente activos son los siguientes [85]:

- Revisión/Mantenimiento de estándares y documentación existente (*Maintenance TG*)
- Seguridad en redes de área local (*Security TG*)
- Redes sensibles al tiempo (*Time-Sensitive Networking -TSN- TG*)

El subgrupo de trabajo TSN TG del IEEE 802.1 se centra en la estandarización de las diversas funciones de las redes sensibles al tiempo, a nivel físico y de enlace. Los orígenes del TSN TG se remontan a 2005, año en el que es formado el IEEE 802.1 *Audio Video Bridging Task Group* (AVB TG) con el objetivo de estandarizar redes para el sector profesional de audio y vídeo [82]. Estas redes requieren gran sincronización entre dispositivos, así como bajas latencia y *jitter*. No

obstante, estos requerimientos también resultan interesantes para otros usos, como industria y automoción, por lo que en 2012 el AVB TG fue renombrado como TSN TG. En 2015, el TSN TG se une al *Interworking TG*, encargado de estandarizar la interconexión de redes de área local (LAN), incluyendo técnicas como puentes de red y LAN virtuales (VLAN), recogidas en el estándar 802.1Q [86].

5.1.3 Designación de los estándares del IEEE 802.1

Los estándares del IEEE 802.1 se identifican con el nombre del grupo de trabajo seguido de varias letras [85], por ejemplo, IEEE 802.1Q. Las letras mayúsculas identifican estándares autónomos, mientras que las letras minúsculas identifican enmiendas al estándar. Las letras no tienen ningún significado específico, sino que son escogidas secuencialmente, añadiendo una letra adicional al llegar a la 'Z' o 'z'. Además, no pueden existir dos estándares con el mismo nombre diferenciados únicamente por mayúsculas o minúsculas.

Aunque anteriormente se empleaban designaciones como IEEE 802.1s para referirse a una enmienda (en este caso particular, enmienda al estándar IEEE 802.1Q), actualmente se emplean designaciones como IEEE 802.1Qat, que recogen en el propio nombre la designación del estándar enmendado, de modo que resulta más sencillo su identificación.

Si un estándar es revisado completamente en lugar de enmendado, se utiliza la notación -REV al final del nombre del estándar original. Por otro lado, si la designación de un estándar comienza con la letra 'P', indica que se trata de un proyecto o estándar en desarrollo.

Finalmente, cada cierto tiempo se genera una nueva versión de un estándar, en la cual se incluyen las revisiones y enmiendas que hayan sido desarrolladas. Dicha nueva versión es identificada añadiendo al final del nombre del estándar un guion seguido del año de publicación de la versión (por ejemplo, IEEE 802.1Q-2018). A menudo, se emplea la denominación sin indicar el año de la versión (IEEE 802.1Q) para referirse a la última versión existente hasta la fecha.

5.2 Visión general los estándares TSN

Los múltiples estándares que dan forma a las TSN del IEEE cubren alguna (o varias) de las funciones de las redes sensibles al tiempo. Dichas funciones pueden englobarse en cuatro facetas fundamentales: sincronización, latencia, fiabilidad y gestión [82].

Los estándares principales de cada una de estas funciones o facetas están ya finalizados. Además, periódicamente se añaden nuevas funcionalidades o mejoras mediante nuevos estándares, algunos de los cuales se encuentran actualmente en curso y otros se encuentran pendientes de comenzar. Por ello, si un dispositivo está marcado como “TSN compatible” no quiere decir que cumpla todos los estándares TSN,

sino que es necesario comprobar la información técnica del producto para averiguar exactamente qué estándares del IEEE implementa y cuáles no [30]. No obstante, una de las ventajas de TSN es que las nuevas versiones son compatibles con las versiones anteriores, como en general ocurre con todas las redes Ethernet.

El principal estándar del IEEE 802.1 respecto a las redes sensibles al tiempo es el **IEEE 802.1Q-2018: *Bridges and Bridged Networks*** [87], por abarcar este documento un gran número de aspectos de las TSN. La primera versión del 802.1Q, publicada en 1998, se centraba en estandarizar una arquitectura y protocolos de particionado lógico de redes de área local (VLANs). Con el tiempo han ido surgiendo nuevas versiones, recogiendo correcciones, enmiendas y partes de otros estándares. Entre otros, la versión actual del 802.1Q recoge la mayor parte del estándar IEEE 802.1D-2004: *Media Access Control (MAC) Bridges*, que especifica el funcionamiento de los puentes de red (dispositivos que permiten la interconexión de diferentes LAN a nivel de enlace).

Dado el gran número de estándares TSN que han acabado formando parte del actual IEEE 802.1Q-2018, la mejor forma de desgranar y analizar las funciones de las redes sensibles al tiempo estandarizadas en dicho documento es explicando tales enmiendas por separado, a pesar de que actualmente estas hayan sido desbancadas por el propio 802.1Q.

Adicionalmente al IEEE 802.1Q existen múltiples estándares TSN independientes, así como enmiendas a otros estándares para incorporar funciones específicas de TSN. En los siguientes apartados se analizarán los estándares TSN del IEEE 802.1, agrupados según la función que desempeñan, planteando una evolución temporal dentro de cada función.

A este último respecto, conviene comentar que todos los estándares desarrollados por el TSN TG desde que tiene esta denominación, así como los desarrollados cuando recibía el nombre de AVB TG, se consideran estándares TSN. No obstante, los estándares anteriores al renombramiento son a menudo conocidos como estándares AVB.

5.3 Funciones de sincronización

Resulta inmediato pensar que una de las funciones básicas en una red sensible al tiempo tenga que ver con la sincronización de los nodos. En este sentido el AVB TG desarrolló, en cooperación con el grupo de trabajo IEEE 1588, el estándar **IEEE 802.1AS-2011: *Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks***, que define los procedimientos para la sincronización temporal de nodos en redes 802.1Q que den soporte a aplicaciones sensibles al tiempo. Además, especifica el empleo del estándar IEEE 1588, incluyendo un perfil PTP (*Precision Time Protocol*) [88].

El estándar IEEE 1588 especifica un protocolo conocido como PTP para la sincronización en tiempo real de los relojes de múltiples nodos de un

sistema distribuido. Su primera versión es el IEEE 1588-2002 (PTP v1), posteriormente sustituida por la IEEE 1588-2008 (PTP v2). Esta última soporta precisiones superiores a 1ns, redundancia y tolerancia a fallos. El protocolo PTP permite especificar un gran número de parámetros y opciones, tanto obligatorias como optativas: formato de mensaje, identificador de dominio, selección de fuente de tiempo, etc. Para facilitar las labores de configuración y garantizar la interoperabilidad, en la versión 1588-2008 se introduce el concepto de “perfil PTP” como conjunto de opciones y valores por defecto para una aplicación determinada [89].

Se está trabajando en una revisión completa de este documento, designado como **P802.1AS-Rev**, que añade mejoras de precisión temporal, así como mecanismos de fiabilidad para la sincronización [90], como el soporte de múltiples dominios temporales para permitir un rápido intercambio de fuente de sincronización en caso de fallo de algún reloj. Recientemente se ha enviado la última versión de esta revisión, el borrador (*Draft*) D8.3 de octubre de 2019, al IEEE SA RevCom (*Review Committee*) para su aprobación, en cuyo caso se convertiría próximamente en el IEEE 802.1AS-2020 [91].

5.4 Funciones de control de latencia

5.4.1 Credit Based Shaper

A partir del trabajo del subgrupo AVB TG aparece una enmienda al IEEE 802.1Q-2005 orientada a gestionar flujos de datos sensibles al tiempo, denominada **IEEE 802.1Qav-2009: *Forwarding and Queueing Enhancements for Time-Sensitive Streams*** [92], posteriormente incluido en el IEEE 802.1Q-2011 [93]. Este estándar especifica un mecanismo de conformado de tráfico denominado *Credit Based Shaper* (CBS), para el control de flujos sensibles al tiempo.

CBS se basa en el encolado de datos (*queueing*) y reenvío (*forwarding*) de manera cíclica [92]. Para ello, cuando una cola está esperando para transmitir va acumulando créditos para transmitir bits, mientras que cuando está transmitiendo gasta dichos créditos. Sólo es posible enviar una trama cuando el crédito disponible no sea negativo y el medio no está ocupado. Pueden definirse diferentes velocidades de generación de créditos en distintas colas, según la prioridad del flujo (hasta 8 prioridades, según los 3 bits de identificador de prioridad en la etiqueta VLAN de la trama 802.1Q). Además, el mecanismo CBS asigna una prioridad mayor al tráfico sensible al tiempo que al tráfico *Best Effort*.

Como tráfico sensible al tiempo distingue entre Clase A, cuyos requisitos de latencia máxima son 2 ms atravesando 7 saltos con un tiempo de ciclo de 125 µs; y Clase B, que relaja los requisitos de latencia hasta los 50 ms sobre 7 saltos, y hasta 250 µs de tiempo de ciclo.

5.4.2 Traffic-Aware Shaper

En el año 2014 aparece una nueva versión del IEEE 802.1Q, aunque no incluye nuevas funcionalidades TSN o modificaciones en este sentido a las ya incorporadas en el IEEE 802.1Q-2011. No es hasta el año 2015 cuando se finaliza una nueva enmienda en las que se venía trabajando desde 2012, denominada **IEEE 802.1Qbv-2015: Enhancements for Scheduled Traffic** [94], posteriormente incluida en el IEEE 802.1Q-2018 [87]. Este estándar extiende los protocolos 802.1Q especificando procedimientos para permitir una transmisión de tramas programada y directamente controlada por tiempo. En concreto, implementa una de las funcionalidades clave de las TSN, el mecanismo de conformado de tráfico denominado *Time-Aware Shaper* (TAS), basado al igual que CBS en una programación de las funciones de encolado de flujos y drenado de colas.

La principal diferencia entre CBS y TAS es que, mientras que el primero es un mecanismo conducido por eventos (existencia o no de crédito y disponibilidad del medio), el nuevo mecanismo es dirigido por temporizadores. Su funcionamiento se basa en asignar *time slots* de duración configurable a cada cola, de manera cíclica, según los identificadores de prioridad VLAN. Si a varias prioridades se le asigna el mismo *time slot*, entrarán en juego otros mecanismos como CSMA/CD, siendo posible combinar múltiples mecanismos de conformado de tráfico (por ejemplo, aplicando CBS a dos prioridades que comparten *time slot*).

En cuanto al rendimiento, TAS especifica una nueva clase de tráfico denominada CDT (*Control Data Traffic*) para tráfico de control en tiempo real, cuya latencia máxima baja hasta los 100 μ s sobre 5 saltos con un tiempo de ciclo de 0,5 ms.

La Figura 21 muestra un ejemplo en el que se ha configurado TAS con 8 prioridades diferentes, asignando a una de ellas un *time slot* en exclusividad, y a las 7 restantes otro *time slot* compartido.

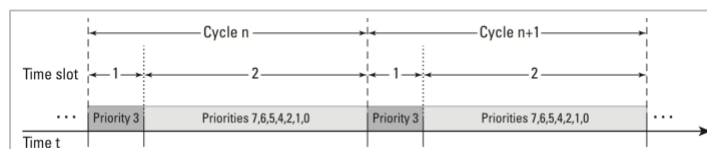


Figura 21 Ejemplo de uso del medio con Time-Aware Shaper [30]

5.4.3 Frame Preemption

En 2016 se finaliza una nueva enmienda denominada **IEEE 802.1Qbu-2016: Frame Preemption** [95], posteriormente incluida en el IEEE 802.1Q-2018 [87], que define una clase de servicio prioritario para tráfico críticamente dependiente del tiempo, incluyendo un mecanismo para interrumpir una transmisión menos prioritaria, así como reanudar una transmisión interrumpida una vez que el tráfico prioritario ha sido enviado. Este mecanismo permite que sea posible enviar tráfico no prioritario cuando no haya otro tráfico siendo transmitido, sin necesidad de mantener

el medio reservado durante un tiempo en el cual puede no estar siendo utilizado, incrementando así la eficiencia global de la red y reduciendo la latencia en el envío de tráfico no prioritario.

Para que el mecanismo de prioridad (*preemption*) sea posible en una red Ethernet, debe implementarse un mecanismo de fragmentado y reensamblaje de tramas a nivel de enlace. El estándar **IEEE 802.3br-2016: Interspersing Express Traffic** [96], posteriormente incluido en el último estándar de Ethernet (IEEE 802.3-2018) [97], define la división lógica de la subcapa MAC para implementar las nuevas funciones, como se muestra en la Figura 22. Por un lado, aparecen las subcapas “Express MAC” (eMAC) y “Preemptable MAC” (pMAC), encargándose la primera del procesamiento de tramas prioritarias a alta velocidad, mientras que la segunda se encarga de tramas susceptibles a ser fragmentadas. Por otro lado, aparece la subcapa “MAC Merge Sublayer”, encargada de arbitrar el acceso al medio por parte tanto de eMAC como de pMAC, así como de almacenar los fragmentos de tramas divididas para su recomposición antes de entregarlas a la pMAC.

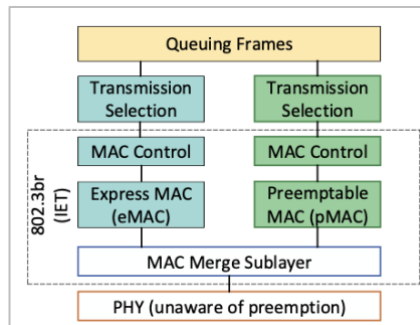


Figura 22 Arquitectura de la subcapa MAC Ethernet 802.3br [6]

El protocolo define además un nuevo formato de trama para saber si una trama está fragmentada y, en tal caso, cómo reensamblarla. La Figura 23 muestra, por un lado, una trama Ethernet tradicional, y por otro, las nuevas tramas prioritaria (*express*) y fragmentable (*preemptable*), esta última en sus versiones sin fragmentar y fragmentada.

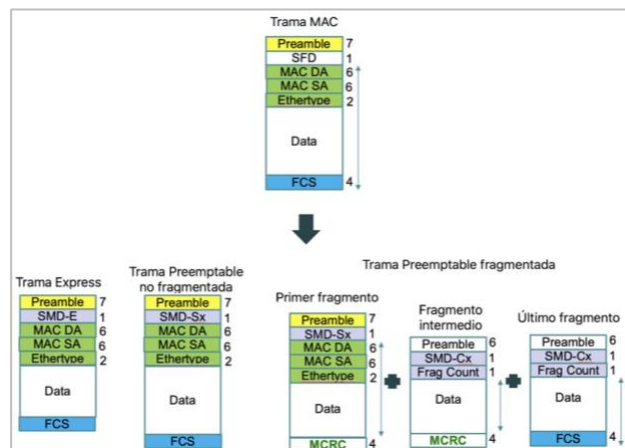


Figura 23 Formatos de trama IEEE 802.3br [98]

Como se puede observar en la Figura 23, el campo SFD (*Start Frame Delimiter*) es sustituido por el campo SMD (*Start Mframe Delimiter*), que puede ser de tipo E (*Express*) para tramas prioritarias, Sx (*Start*) para indicar el inicio de una trama fragmentable, o Cx (*Continuation*) para indicar que es un fragmento no inicial. Además, los fragmentos no iniciales deben llevar un indicador de orden (*Frag Count*) para poder ordenarlos. Por último, en las tramas fragmentables que no son el último fragmento, el campo de verificación de integridad de la trama (FCS, *Fragment Check Sequence*) es sustituido por el campo MCRC (*Mframe Cyclic Redundancy Check*), que coincide con el campo FCS pero con los últimos dos octetos invertidos (XOR FFFF0000), con el doble fin de distinguir si una trama no está fragmentada o si es el primer fragmento de una trama fragmentada, así como de distinguir fragmentos intermedios de fragmentos finales.

Actualmente, el mecanismo de conformado de tráfico TAS (IEEE 802.1Qbv-2015), junto con el mecanismo de prioridad (802.1Qbu-2016), soportado por el nuevo nivel MAC Ethernet (802.3br-2016), se consideran los mecanismos clave de las TSN [30].

5.4.4 Cyclic Queueing and Forwarding

Posteriormente, en 2017 se publica el estándar **IEEE 802.1Qch-2017: Cyclic Queueing and Forwarding** [99], que más tarde sería incluido en el IEEE 802.1Q-2018 [87]. Este estándar define el método de conformado de tráfico CQF (*Cyclic Queueing and Forwarding*), también conocido como PS (*Peristaltic Shaper*), que ofrece menos precisión en cuanto a latencia y *jitter* que TAS, pero que también requiere menos esfuerzo de configuración, por lo que es adecuado para aplicaciones sensibles al tiempo tolerantes a cierta latencia y *jitter*.

El funcionamiento de CBS se basa en que en cada salto se produce el almacenamiento de todas las tramas recibidas durante un ciclo, reenviándolas en el ciclo siguiente pero priorizando el tráfico prioritario sobre el tráfico *Best Effort*. De este modo, se garantiza que el tráfico prioritario tendrá un retraso máximo fijo (la duración de un ciclo multiplicado por el número de saltos hasta el destino), al mismo tiempo que se evita tener que configurar los *time slots* asignados a las diversas prioridades.

5.4.5 Asynchronous Traffic Shaping

Actualmente se está en proceso de estandarización de un nuevo conformador de tráfico, según el estándar **P802.1Qcr: Asynchronous Traffic Shaping** (ATS) [100], que pretende superar dos desventajas de los mecanismos síncronos planteados hasta ahora: la alta dependencia con los mecanismos de sincronización distribuida, y el potencial uso ineficiente de la red al forzar la transmisión en ciclos periódicos [7]. El funcionamiento de ATS se basa en que las fuentes de un flujo (*talkers*) deciden cuándo y qué transmitir, siempre y cuando cumplan con los límites de tasa de tráfico preconfigurados. Nuevamente, en cada salto

vuelve a regularse el tráfico de manera individual por cada flujo o bien por cada conjunto de flujos. Por lo tanto, puede considerarse ATS como un mecanismo de conformado jerárquico (por salto).

La regulación del tráfico mediante ATS se realiza en cada dispositivo asignando una cola a cada flujo o conjunto de flujos, y a cada cola se le asigna un valor interno de prioridad (IPV, *Internal Priority Value*). Además, cada cola contiene información adicional, como el instante en el que se encoló cada trama (*timestamp*). El vaciado de las colas es controlado mediante un reloj local independiente, un controlador de tasa de transmisión que gestiona el ancho de banda preconfigurado que es empleado por cada flujo localmente, y un programador que asigna políticas preconfiguradas de vaciado (por ejemplo, drenar primero la cola en la que más tiempo lleva el tráfico esperando o drenar primero la cola cuyo vencimiento esté más próximo). Al separar la gestión de ancho de banda de la política de drenado de colas, se posibilita la existencia de flujos de bajo ancho de banda, pero al mismo tiempo baja latencia.

No obstante, el conformado ATS presenta problemas de escalabilidad. Al ser preciso en un sistema real garantizar la latencia extremo a extremo, y dado que el conformado de tráfico se realiza de manera independiente en cada salto, se hace preciso realizar un reordenamiento de paquetes dinámico en cada salto bastante difícil de controlar a medida que la red crece, requiriendo además grandes cantidades de memoria para la implementación de grandes colas.

5.5 Funciones de fiabilidad

El objetivo de las funciones de fiabilidad es garantizar la entrega de las tramas transmitidas con independencia de las condiciones de la red, incluyendo el fallo o incluso corte de enlaces.

En este sentido, en el año 2015 se finaliza el estándar **IEEE 802.1Qca-2015: Path Control and Reservation** (PCR) [101], posteriormente incluido en el IEEE 802.1Q-2018 [87]. Este estándar extiende el protocolo de estado de enlace IS-IS (*Intermediate System to Intermediate System*) para su aplicabilidad en redes 802.1Q, especificando mecanismos de control explícito de caminos y reserva de ancho de banda para el establecimiento y restauración de caminos alternativos, con el fin de proporcionar redundancia sin interrupciones y/o mediante restauración de caminos para flujos de datos sensibles al tiempo.

PCR emplea una aproximación híbrida SDN (*Software Defined Networking*). En esta aproximación, el protocolo IS-IS se emplea a nivel local para funciones de descubrimiento de topología y cálculo del camino por defecto. Por otro lado, se utilizan controladores SDN (PCEs, *Path Computation Elements*) para calcular caminos redundantes, interactuando con los protocolos IS-IS y SRP (ver apartado 5.6) para el control de caminos alternativos y reserva de ancho de banda [6].

En 2017 aparece el estándar **IEEE 802.1CB-2017: *Frame Replication and Elimination for Reliability*** (FRER) [102], posteriormente incluido en el IEEE 802.1Q-2018 [87]. que incluye un mecanismo de redundancia sin interrupciones. Su funcionamiento se basa en replicar cada trama, enviando las réplicas por dos (o más) caminos disjuntos hasta el destino. Cuando en un nodo se recibe varias veces la misma trama, solamente considera la primera de ellas, descartando las siguientes. Para evitar la congestión, pueden aplicarse políticas de replicación y descarte de tramas duplicadas en función de clases de tráfico, de manera que se priorice la redundancia en tráficos menos tolerantes a fallos [6].

El mismo año aparece el estándar **802.1Qci-2017: *Per-Stream Filtering and Policing*** (PSFP) [103], que permite contar, filtrar y aplicar políticas a cada trama de cada flujo, en base al cumplimiento de ciertas reglas. Esto permite detectar y mitigar el efecto de transmisiones que afecten al buen funcionamiento de la red, como por ejemplo dispositivos que excedan el ancho de banda asignado (malfuncionamiento, ataques DoS, etc.), aumentando así la robustez del sistema.

Actualmente se encuentra en desarrollo el estándar **P802.1Qcz: *Congestion Isolation*** [104], que especifica un servicio a los niveles superiores para permitir el control de la congestión extremo a extremo, con el fin de mantener el control de la latencia y evitar la pérdida de paquetes por este motivo. Este estándar se basa en la definición de protocolos y mecanismos para identificar flujos que estén causando congestión, ajustar la transmisión de dichos flujos en base a la prioridad asignada a dicho flujo, e informar a los nodos vecinos de esta circunstancia.

Por último, la revisión del estándar **P802.1AS-Rev: *Time Synchronization for Time-Sensitive Applications - Revision***, si bien es un estándar para la función de sincronización de nodos, añade mecanismos de fiabilidad para la sincronización, tal y como se expuso en el apartado 5.3. Hay que tener incluso pequeños fallos en la sincronización entre nodos puede provocar que el medio esté ocupado en el momento en el que una trama proveniente de un flujo de datos críticamente dependiente del tiempo deba ser transmitida, ocasionando graves fallos en el sistema. Por ello, se considera que este estándar forma parte también de las funciones de fiabilidad TSN [90].

5.6 Funciones de configuración y gestión

El objetivo de las funciones de configuración y gestión es permitir al usuario el descubrimiento y configuración de las capacidades de los nodos de la red para gestionar los recursos asignados a flujos de datos.

En este ámbito, con el subgrupo AVB TG aparece una enmienda al IEEE 802.1Q-2005 denominada **IEEE 802.Qat-2010: *Stream Reservation Protocol*** [105], posteriormente incluido en el IEEE 802.1Q-2011 [93]. Este estándar especifica un servicio de reserva de recursos de red para flujos

de tráfico concretos, así como un protocolo para posibilitar dicho servicio (SRP, *Stream Reservation Protocol*).

El funcionamiento de SRP se basa en un mecanismo que permite registrar flujos (*stream registration*) en los saltos que conforman el camino de dicho flujo. Cada uno de estos flujos tiene un origen (*talker*) y un destino (*listener*), y durante el registro, cada salto reserva un determinado ancho de banda para priorizar dicho flujo, pudiendo rechazarlo en caso de excederse el ancho de banda disponible en un puerto.

El protocolo SRP fue extendido posteriormente por el estándar **IEEE 802.1Qcc-2018: *Stream Reservation Protocol Enhancements and Performance Improvements***, que incluye mejoras específicas para flujos TSN [30].

Por otro lado, en 2018 se publica el estándar **IEEE 802.1Qcp-2018: *YANG Data Model*** [106], que enmienda el IEEE 802.1Q-2018. Este estándar especifica un modelo de datos YANG para la configuración de ciertas características y el reporte de estado operativo de los puentes de red. YANG (*Yet Another Next Generation*) es un lenguaje de modelado de datos para la definición formal de la configuración y reporte periódico del estado operacional de un dispositivo, documentado en 2010 por el IETF en la RFC 6020 [107].

Una vez definido el modelo básico de datos YANG, han comenzado a desarrollarse estándares para añadir capacidades adicionales de configuración empleando YANG, como son:

- **P802.1Qcx: *YANG Data Model for Connectivity Fault Management*** (CFM). CFM se refiere a una serie de protocolos y procedimientos para gestionar problemas de conectividad, como descubrimiento y verificación de caminos y detección y aislamiento de fallos de conexión, estandarizados bajo el IEEE 802.1ag-2007 (incluido en el 802.1Q-2011). El estándar P802.1Qcx proporciona un modelo de datos YANG para la configuración de CFM en los puentes de red.
- **P802.1Qcw: *YANG Data Models for Scheduled Traffic, Frame Preemption, and Per-Stream Filtering and Policing***. Este estándar proporciona modelos de datos YANG para la configuración de conformadores de tráfico TAS (802.1Qbv, apartado 5.4.2 de este TFM), mecanismos de prioridad (802.1Qbu, apartado 5.4.3 del TFM) y políticas y reglas PSFP (802.1Qci, apartado 5.5 del TFM) en los puentes de red.
- **P802.1CBcv: *FRER YANG Data Model and Management Information Base Module***. Este estándar proporciona un modelo de datos YANG y un módulo MIB para la configuración y gestión del mecanismo de redundancia sin interrupciones FRER (802.1CB, apartado 5.5 de este TFM) en los puentes de red. Un módulo MIB (*Management Information Base*) es un modelo de datos que define los parámetros que puede emplear el protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*) para supervisar y gestionar un dispositivo.
- **P802.1ABcu: *YANG Data Model for the Link Layer Discovery Protocol*** (LLDP). Este estándar proporciona modelos de datos YANG para la configuración y reporte de estado de puentes de red en lo referente a descubrimiento de topología empleando el protocolo LLDP (IEEE 802.1AB)

Otros estándares actualmente en curso que incluyen funciones en esta área son:

- **P802.1Qdd: Resource Allocation Protocol (RAP).** Este estándar especifica el protocolo RAP para la gestión distribuida y dinámica de recursos y control de admisión, teniendo en cuenta la QoS requerida. Se basa en el empleo del protocolo LRP (P802.1CS) explicado a continuación, y proporciona soporte para el cálculo preciso y reporte de latencia extremo a extremo.
- **P802.1CS: Link-local Registration Protocol (LRP).** Se trata de un estándar que especifica el protocolo LRP de distribución de información (bases de datos de registro de identificadores VLAN, flujos, etc) a través de un enlace de nivel 2. Su función es ser empleado en conjunto con otro protocolo para mantener información replicada en puntos múltiples de la red, por ejemplo, empleando RAP (*Resource Allocation Protocol*, P802.1Qdd).
- **P802.1CBdb: FRER Extended Stream Identification Functions.** Estándar que especifica procedimientos para añadir nuevas funciones de identificación de flujos y gestión del mecanismo de redundancia FRER (ver apartado 5.5).

Por último, se ha comenzado a trabajar en los siguientes estándares, aunque hasta la fecha no existe ninguna versión disponible:

- **P802.1Qdj: Configuration Enhancements for Time-Sensitive Networking.** Este estándar incluye mejoras en la interfaz usuario-red (UNI, User-Network Interface) para la configuración de redes TSN.
- **P802.ABdh: Support for Multiframe Protocol Data Units.** Se trata de una nueva versión del protocolo LLDP (IEEE 802.1AB) para permitir la distribución de TLVs (*Type Length Values*, estructuras de datos empleadas por el protocolo LLDP para el intercambio de información) que no quepan en una única trama

5.7 Perfiles TSN

Como se puede deducir del apartado anterior, existe una ingente cantidad de estándares y funciones que un dispositivo o red puede implementar o no, en función del uso que se vaya a dar a la red y el sistema al que dará soporte. Para facilitar el desarrollo de productos y despliegue de redes para usos concretos, existen una serie de estándares del IEEE 802.1 cuyo objetivo es definir *profiles* (perfiles) en los que se seleccionan una serie de características, opciones y protocolos que un fabricante puede implementar en sus dispositivos para un uso en concreto. Asimismo, el empleo de dispositivos que implementen estos perfiles permiten el despliegue de redes para el uso al que se vaya a destinar, de manera sencilla y garantizando la interoperabilidad.

Actualmente existen dos estándares definidos por el IEEE 802.1 para perfiles específicos en redes TSN:

- **IEEE 802.1BA-2011 - Audio Video Bridging (AVB) Systems:** Estándar del AVB TG que “define los perfiles que seleccionan funciones, opciones, configuraciones, valores por defecto, protocolos y procedimientos a implementar en puentes de red,

estaciones y LANs para construir redes capaces de transportar flujos de audio y/o vídeo sensibles al tiempo” [108].

- **IEEE 802.1CM-2018 - Time-Sensitive Networking for Fronthaul:** Estándar que define perfiles para construir redes de *fronthaul* para sistemas celulares C-RAN (*Cloud/Centralized Radio Access Network*) [109]. Además, se encuentra en curso la enmienda P802.1CMde, que define modificaciones a estos perfiles para incluir nuevos desarrollos en los estándares de *fronthaul* relativos a interfaz, sincronización y sintonización [110].

Adicionalmente, a fecha de finalización de este TFM se encuentra en curso los siguientes estándares de perfiles TSN:

- **IEC/IEEE 60802 - TSN Profile for Industrial Automation:** Estándar que define perfiles de red para automatización industrial. Su última versión es el borrador (*Draft*) 1.1 de 11 de septiembre de 2019 [111].
- **P802.1DG - TSN Profile for Automotive In-Vehicle Ethernet Communications:** Estándar que define perfiles de red para la interconexión de sistemas en vehículos. Su última versión es el borrador D1.1 de 09 de octubre de 2019 [112].

Por último, actualmente existe un proyecto de estandarización de perfiles para proveedores de servicios de red (**P802.1DF - TSN Profile for Service Provider Networks**), aunque aún no se ha publicado ningún borrador [113].

5.8 Resumen y conclusiones

A este capítulo se ha justificado la necesidad de adoptar un conjunto de estándares que, **proveyendo de capacidades nuevas a las tecnologías de Ethernet actuales**, resuelva los problemas a los que la Industria 4.0 se enfrenta en lo referente a infraestructura de comunicación, y ante los cuales las redes Ethernet básicas presentan carencias.

Entre las características que deben presentar las redes Ethernet TSN para alcanzar su objetivo, pero que las redes Ethernet estándar no pueden garantizar, se encuentran las siguientes:

- Comportamiento determinista.
- Retardo controlado, bajo, y con pequeñas variaciones (*jitter*).
- Sin pérdida de paquetes por congestión.
- Posibilidad de transmisión de tráfico no prioritario, mientras se garantiza el tráfico en tiempo real (RT).

Para lograrlo, se requiere la implementación de una serie de capacidades que podríamos englobar en cuatro conjuntos de funciones básicas: **sincronización, control de latencia, fiabilidad y gestión**. En este sentido, el grupo de trabajo IEEE 802.1TSN ha publicado una serie de estándares para especificar los procedimientos, protocolos y objetos a implementar para realizar dichas funciones.

En cuanto a la **sincronización**, *a priori* se considera necesario que los relojes internos de los nodos sigan la misma base temporal para que estos trabajen de manera coordinada. Para lograrlo, las TSN emplean el estándar IEEE 802.1AS, que incluye un **perfil PTP** (IEEE 1588).

Las funciones de **control de latencia** tienen por objeto garantizar que la información llega en los instantes en que se requiere. En este sentido se han descrito cuatro mecanismos de **conformado de tráfico**: **CBS** (802.1Qav), **TAS** (802.1Qbv), **CQF** (802.1Qch) y **ATS** (802.1Qcr). Se trata de mecanismos mediante los cuales cada nodo clasifica la información a transmitir almacenándola en diferentes colas (en función del tipo de tráfico, procedencia, etc.), aplicando algún tipo de regla para priorizar unas colas sobre otras y transmitiendo en instantes controlados por algún evento o temporizador. Asimismo, se ha descrito el mecanismo de **prioridad** (802.1Qbu, 802.3br), que modifica la subcapa MAC Ethernet y el formato de trama 802.1Q con el fin de que la transmisión de una trama de baja prioridad pueda ser interrumpida por tramas prioritarias, reanudando posteriormente la transmisión de las tramas interrumpidas, y reensamblando los fragmentos recibidos en destino.

Para proveer de **fiabilidad** a la red, se han descrito los estándares **PCR** (802.1Qca) para reservar y restaurar caminos alternativos; **FRER** (802.1CB), para proveer redundancia transparente; y **PSFP** (802.1Qci), para aplicar políticas de filtrado de tráfico. Asimismo, se ha presentado el estándar de **aislamiento de congestión** (802.1Qcz).

En lo referente a las funciones de **gestión** de la red, se han presentado un conjunto de protocolos y modelos de datos estandarizados que proveen de mecanismos para el descubrimiento de capacidades, reserva de recursos, configuración de los nodos de la red y verificación del estado operativo de los nodos y enlaces.

Por último, se han presentado un conjunto de estándares denominados perfiles TSN, cuyo objetivo es servir de guía a fabricantes y usuarios para facilitar la implementación, selección y configuración de dispositivos y redes para aplicaciones específicas. Actualmente hay desarrollados perfiles TSN para sistemas de audio y vídeo sensibles al tiempo (802.1BA) y para *fronthaul* (802.1CM), existiendo otros estándares en curso o pendientes para automatización industrial (IEC/IEEE 60802), sistemas de automoción (802.1DG) y proveedores de servicios de red (P802.1DF).

A modo de resumen de los estándares analizados en este capítulo, se incluye a continuación la Tabla 9, que muestra una clasificación de dichos estándares de acuerdo con las funciones en las que se centra.

Función	Estándar	Título	Desarrollos	Estado	Observaciones
Sincronización	802.1AS-2011	Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks	Sincronización de los relojes de los dispositivos, incluye un perfil PTP (IEEE 1588-2008).	Terminado	- Estándar del AVB TG. - En curso revisión P802.1AS-Rev
Sincronización / Fiabilidad	P802.1AS-Rev	Time synchronization for time-sensitive applications — Revision	Mejora la precisión de IEEE 802.1AS-2011, y añade mecanismos de fiabilidad sobre la sincronización.	En curso	- Revisión del 802.1AS-2011 - Pendiente de aprobación definitiva como 802.1AS-2020
Fiabilidad	802.1Qca-2015	Path Control and Reservation	Redundancia PCR	Terminado	- Enmienda el 802.1Q-2014. - Ya incluido en el 802.1Q-2018.
	802.1CB-2017	Frame Replication and Elimination for Reliability	Redundancia FRER	Terminado	-
	802.1Qci-2017	Per-Stream Filtering and Policing	Filtrado y aplicación de políticas sobre tramas en base a reglas por flujo	Terminado	- Enmienda el 802.1Q-2014. - Ya incluido en el 802.1Q-2018.
	P802.1Qcz	Congestion Isolation	Servicio de identificación y asilamiento de la congestión extremo a extremo	En curso	- Enmienda el 802.1Q-2018. - Última versión: D0.5 (oct'19)
Control de latencia	802.1Qav-2009	Forwarding and Queueing Enhancements for Time-Sensitive Streams, which specifies the Credit Based Shaper	Conformado CBS	Terminado	- Estándar del AVB TG. - Enmienda el 802.1Q-2005. - Ya incluido en el 802.1Q-2018.
	802.1Qbv-2015	Enhancements for scheduled traffic	Conformado TAS	Terminado	- Enmienda el 802.1Q-2014. - Ya incluido en el 802.1Q-2018.
	802.1Qbu-2016	Frame preemption	Mecanismos de prioridad (<i>Preemption</i>)	Terminado	- Enmienda el 802.1Q-2014. - Ya incluido en el 802.1Q-2018.
	802.3br-2016	Interspersing Express Traffic		Terminado	- Enmienda el 802.3-2015.
	802.1Qch-2017	Cyclic Queueing and Forwarding	Conformado CQF	Terminado	- Enmienda el 802.1Q-2014. - Ya incluido en el 802.1Q-2018.
	P802.1Qcr	Asynchronous Traffic Shaper	Conformado ATS	En curso	- Enmienda el 802.1Q-2018. - Última versión: D1.3 (oct'19)
Configuración y gestión	802.1Qat-2010	Stream Reservation Protocol (SRP)	Servicio de reserva de recursos y protocolo asociado SRP	Terminado	- Estándar del AVB TG. - Enmienda el 802.1Q-2005. - Ya incluido en el 802.1Q-2018.
	802.1Qcc-2018	Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements	Mejoras a SRP para configuración TSN	Terminado	- Enmienda el 802.1Q-2018.
	802.1Qcp-2018	YANG Data Model	Modelo de datos YANG 802.1Q básico	Terminado	- Enmienda el 802.1Q-2018.
	P802.1Qcx	YANG Data Model for Connectivity Fault Management (CFM)	Modelo de datos YANG incluyendo CFM	En curso	- Enmienda el 802.1Q-2018. - Última versión: D2.0 (dic'19)

	P802.1ABcu	YANG Data Model for the Link Layer Discovery Protocol (LLDP)	Modelo de datos YANG incluyendo LLDP	En curso	- Enmienda el 802.1AB-2016. - Última versión: D0.6 (nov'18)
	P802.1Qcw	YANG Data Models for Scheduled Traffic, Frame Preemption, and Per-Stream Filtering and Policing	Modelo de datos YANG incluyendo TAS, prioridad y PSFP	En curso	- Enmienda el 802.1Q-2014. - Última versión: D1.0 (dic'19)
	P802.1CBcv	FRER YANG Data Model and Management Information Base (MIB) Module	Modelo de datos YANG y módulo MIB para FRER	En curso	- Enmienda el 802.1CB-2017. - Última versión: D0.2 (dic'19)
	P802.1CS	Link-local Registration Protocol	Protocolo LRP de replicación de bases de datos de registros de nivel 2.	En curso	- Última versión: D2.4 with MIB and YANG (nov'19)
	P802.1Qdd	Resource Allocation Protocol	Protocolo RAP de gestión dinámica y distribuida de recursos.	En curso	- Enmienda el 802.1Q-2018. - Última versión: D0.1 (oct'19)
	P802.1CBdb	FRER Extended Stream Identification Functions	Nuevas funciones de identificación de flujos en FRER	En curso	- Enmienda el 802.1CB-2017. - Última versión: D0.4 (dic'19)
	P802.1Qdj	Configuration Enhancements for Time-Sensitive Networking.	Mejoras de configuración TSN	Pendiente	- No disponible aún
	P802.1ABdh	Support for Multiframe Protocol Data Units	LLDPv2 para TLVs que no quepan en una trama	Pendiente	- No disponible aún
Perfiles	802.1BA-2011	Audio Video Bridging (AVB) Systems	Perfil TSN para AVB	Terminado	-
	802.1CM-2018	Time-Sensitive Networking for Fronthaul	Perfil TSN para Fronthaul	Terminado	-
	P802.1CMde	Enhancements to Fronthaul Profiles to Support New Fronthaul Interface, Synchronization, and Syntonization Standards	Enmienda del perfil TSN para Fronthaul, para incluir nuevos desarrollos en este ámbito	En curso	- Última versión: D2.0 (sep'19)
	IEC/IEEE 60802	TSN Profile for Industrial Automation	Perfil TSN para automatización industrial	En curso	- Última versión: D1.1 (sep'19)
	P802.1DG	TSN Profile for Automotive In-Vehicle Ethernet Communications	Perfil TSN para sistemas dentro de vehículos	En curso	- Última versión: D1.1 (oct'19)
	P802.1DF	TSN Profile for Service Provider Networks	Perfil TSN para proveedores de servicios de red	Pendiente	- No disponible aún

Tabla 9 Cuadro resumen de estándares TSN del IEEE

6 Conclusiones

6.1 Conclusiones generales

En este TFM se ha presentado el concepto y modelo clásico de automatización industrial, así como los retos que presentan las redes de automatización. En este sentido, se concluye que, en un modelo tradicional de automatización, a nivel de campo debe garantizarse un funcionamiento en **tiempo real** estricto, debiendo las redes soportar la transmisión de pequeños volúmenes de datos, pero **de manera cíclica, con una alta frecuencia, baja latencia, y bajo jitter, garantizando la entrega y el tiempo de ciclo de los procesos.**

A este nivel, la solución tradicional ha consistido en la implementación de **buses de campo**. El propósito de estos es ofrecer capacidades de comunicación entre dispositivos industriales a dicho nivel y con el nivel de control. En este TFM se han analizado diversas tecnologías en este sentido concluyendo que, si bien son capaces de ofrecer capacidades de **comunicación determinista** de manera altamente exitosa, se trata de **sistemas muy específicos, poco escalables, poco interoperables, incompatibles con aplicaciones de IT y limitados en cuanto al tamaño de la red (dimensiones y número de dispositivos).**

Por otro lado, se ha expuesto cómo la integración de las nuevas tecnologías digitales en los sistemas de automatización industrial está dando lugar a una cuarta revolución industrial o **Industria 4.0**. Estas redes involucran a **gran cantidad de dispositivos y un flujo continuo y cíclico de información entre los sistemas de control de producción y los sistemas de negocio, garantizando y priorizando el tráfico en tiempo real**. Se produce una transformación de pirámide a **pilar de automatización**, en el que el **nivel de conectividad** cobra un papel protagonista.

Los buses de campo son incapaces de ofrecer soluciones satisfactorias en el escenario actual, por lo que la tendencia actual es implementar de tecnologías de **Ethernet industrial**. Estas tecnologías aprovechan las ventajas de Ethernet (disponibilidad y precio del **hardware**, posibilidad de conectar **gran número de dispositivos, acceso remoto, ancho de banda**, etc.), implementando **modificaciones** a la arquitectura estándar para ofrecer **comportamiento determinista, con bajas latencia y jitter.**

En este TFM se han analizado diversas tecnologías de Ethernet industrial. Se concluye que estas tecnologías recurren a distintos mecanismos *software* y/o *hardware* para implementar **mecanismos de acceso al medio alternativos a CSMA/CD** basados principalmente en **distribución de tiempo** y/o en **paso de turno**, dada la aleatoriedad temporal introducida por CSMA/CD.

Aunque las diversas tecnologías de Ethernet industrial tienen su cabida en el contexto actual, cada vez se requiere la integración de más dispositivos en la red, procedentes de múltiples fabricantes, con requisitos de mayor ancho de banda, garantizando la compatibilidad con hardware Ethernet existente, y permitiendo la integración de tráfico no prioritario y en tiempo NO real (NRT), sin afectar al tráfico crítico en tiempo real (RT)

Estas características propias de la Industria 4.0 hacen necesaria la adopción de estándares comunes, ampliamente reconocidos, y que resuelvan de manera global las diversas problemáticas aquí planteadas. Ante esta situación, el IEEE propone la estandarización de las redes sensibles al tiempo o TSN, centrándose en las capas física y de enlace del modelo. Asimismo, el IETF se encuentra trabajando en los estándares DETNET de nivel de red y superiores.

Para lograrlo, se requiere la implementación de una serie de capacidades que podríamos englobar en cuatro conjuntos de funciones básicas: **sincronización** de los relojes internos de los nodos; **control de latencia**, mediante técnicas específicas de conformado del tráfico e interrupción de transmisiones para el envío de tráfico prioritario; **fiabilidad** para asegurar la entrega de tráfico crítico, mediante redundancia sin interrupciones, restablecimiento ante fallos y aislamiento de tráfico indeseado y/o congestión; y **gestión** de red, mediante protocolos de configuración y supervisión de los dispositivos y los enlaces.

Actualmente se dan por concluidos los estándares básicos TSN, entre los que se incluyen el estándar de sincronización, varios mecanismos de conformado de tráfico, un mecanismo de prioridad, y varios mecanismos de redundancia, recuperación ante fallos y gestión de red. No obstante, se trata de un campo de alto interés tecnológico, y son numerosos los actores involucrados en investigación y nuevos desarrollos en este área.

6.2 Trabajo futuro

Se sugieren dos grandes líneas de trabajo futuro en el ámbito de este TFM. En primer lugar, se propone implementar se propone la realización de un análisis de las alternativas tecnológicas en el ámbito de las redes industriales inalámbricas, valorando las opciones tradicionales, así como la posibilidad de implementar mecanismos TSN de sincronización y control de latencia sobre tecnologías inalámbricas como, por ejemplo, conformado de tráfico TAS sobre redes IEEE 802.11.

Por otro lado, se propone la implementación y valoración de escenarios TSN modelados. En esta línea se sugieren diversas alternativas, como pueden ser la implementación de mecanismos de conformado de tráfico (TAS, CQF, ATS) sobre simuladores de red como ns3, o bien valorar alternativas para la emulación de puentes de red con capacidades TSN sobre máquinas virtuales (Cisco IOU L2, NX-OSv, Arista vEOS) en GNS3.

7 Glosario

AI	Artificial Intelligence
ANSI	American National Standards Institute
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
ATS	Asynchronous Traffic Shaper
AVB	Audio Video Bridging
bps	Bits por segundo
CAN	Controller Area Network
CBS	Credit Based Shaper
CDT	Control Data Traffic
CIP	Common Industrial Protocol
CP	Communication Profile
CPF	Communication Profile Family
CPS	Cyber-Physical Systems
CQF	Cyclic Queueing and Forwarding
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CSMA/NBA	Carrier Sense Multiple Access with Non-destructive Bit-wise Arbitration
CTDMA	Concurrent Time Domain Multiple Access
DMZ	DeMilitarized Zone
EIA	Electronic Industries Association
ERP	Enterprise Resource Planning
FDL	Field bus Data Link
FPGA	Field-Programmable Gate Array
FRER	Frame Replication and Elimination for Reliability
GPCC	General-Purpose Communication Controller
HDLC	High level Data Link Control
HMI	Human Machine Interface
I/O	Input/Output
IAONA	Industrial Automation Open Network Alliance
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IET	Interspersing Express Traffic
IETF	Internet Engineering Task Force
IIoT	Industrial Internet of Things
INCIBE	Instituto Nacional de Ciberseguridad
IoT	Internet of Things
IRT	Isochronous Real Time
ISA	International Society of Automation
ISO	International Organization for Standardization
IT	Information Technology
kbps	Kilobits por segundo (equivalente a 1.000 bps)
LAN	Local Area Network

LLDP	Link Layer Discovery Protocol
LRP	Link-local Registration Protocol
MAC	Media Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
Mbps	Megabits por segundo (equivalente a 1.000 kbps)
MES	Manufacturing Execution System
MIB	Management Information Base
OLM	Optical Link Module
OSI	Open System Interconnection
OT	Operational Technology
PCR	Path Control and Reservation
PDP	Physical to Digital to Physical
PERA	Purdue Enterprise Reference Architecture
PID controller	Proportional-Integral-Derivative controller
PLC	Programmable Logic Controller
PNO	PROFIBUS Nutzerorganisation
PS	Peristaltic Shaping
PTP	Precision Time Protocol
QoS	Quality of Service
RAP	Resource Allocation Protocol
RT	Real-Time
RTE	Real-Time Ethernet
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SCI	Sistema de Control Industrial
SDN	Software Defined Networking
SNMP	Simple Network Management Protocol
SRP	Stream Reservation Protocol
TAS	Time Aware Shaper
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TFM	Trabajo de Fin de Máster
TI	Tecnología de la Información
TLS	Transport Layer Security
TSN	Time Sensitive Networking
ULL	Ultra-Low Latency
UML	Unified Modeling Language
UNI	User-Network Interface
VCTF	Vinyl CabTire Fiber cable
WAN	Wide Area Network

8 Bibliografía

- [1] R. Caler Rubio, Análisis y estudio de comunicaciones industriales para implementar arquitectura de comunicaciones estándar en Planta Estándar de Ciclo Combinado, Universidad de Alcalá, 2015.
- [2] M. Herrero Collantes y A. López Padilla, «Protocolos y Seguridad de red en infraestructuras SCI,» INCIBE, 2017.
- [3] J. A. García Arias, Trabajo Final de Máster: Investigación de la Ciberseguridad aplicada a los Sistemas de Control Industrial con énfasis en el sector energético, Universitat Oberta de Catalunya, 2017.
- [4] Á. R. Rojas Castro, Protección en infraestructuras críticas. Análisis de seguridad de los sistemas de control industrial, Universitat Oberta de Catalunya, 2019.
- [5] L. Lachello, P. Wratil, A. Meindl, S. Schönegger, B. S. Karunakaran, H. Song y S. Potier, «Industrial Ethernet Facts - The 5 Major Technologies: System comparison,» 03 2016. [En línea]. Available: https://www.ethernet-powerlink.org/fileadmin/user_upload/Dokumente/Industrial_Ethernet_Facts/EPSCG_IEF3rdEdition_en.pdf. [Último acceso: 10 11 2019].
- [6] A. Nasrallah, A. S. Thyagaturu, Z. Alharbi, C. Wang, X. Shao, M. Reisslein y H. ElBakoury, «Ultra-Low Latency (ULL) Networks: The IEEE TSN and IETF DetNet Standards and Related 5G ULL Research,» 2018.
- [7] A. Nasrallah, A. S. Thyagaturu, Z. Alharbi, C. Wang, X. Shao, M. Reisslein y H. Elbakoury, «Performance Comparison of IEEE 802.1 TSN Time Aware Shaper (TAS) and Asynchronous Traffic Shaper (ATS),» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44165-44181, 2019.
- [8] F. Marsellach, «Introducción a la Automatización,» FMJ Ingenieros, 28 02 2018. [En línea]. Available: <https://www.fmjingenieros.com/servicios/automatizacion-industrial/introduccion-a-la-automatizacion>. [Último acceso: 06 10 2019].
- [9] F. Domínguez Gros y J. Solé Casals, «Descripción de un sistema de instrumentación,» Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona.
- [10] A. Espert, «SCADA. ¿Qué es y qué permite hacer?,» Sothis, 22 05 2018. [En línea]. Available: <https://www.sothis.tech/scada-que-es-y-que-permite-hacer/>. [Último acceso: 12 10 2019].
- [11] CIC Consulting Informático, «Industria 4.0, la cuarta revolución industrial y la inteligencia operacional,» 14 01 2019. [En línea]. Available: <https://www.cic.es/industria-40-revolucion-industrial/>. [Último acceso: 09 10 2019].
- [12] Control de Producción, «Pilares de la nueva revolución industrial,» Producción en la Industria 4.0, 12 04 2019. [En línea]. Available: <https://controldeproduccion.info/pilares-de-la-nueva-revolucion-industrial/>. [Último acceso: 09 10 2019].

- [13] Geinfor, «¿Qué es la Industria 4.0?,» [En línea]. Available: <https://geinfor.com/blog/industria-40/>. [Último acceso: 12 10 2019].
- [14] Aldakin, «Industria 4.0. Qué es, ventajas e inconvenientes,» [En línea]. Available: <http://www.aldakin.com/industria-4-0-que-es-ventajas-e-inconvenientes/>. [Último acceso: 09 10 2019].
- [15] Deloitte, «¿Qué es la Industria 4.0?,» [En línea]. Available: ¿Qué es la Industria 4.0?. [Último acceso: 09 10 2019].
- [16] T. J. Williams, A Reference Model For Computer Integrated Manufacturing (CIM), Durham, NC: Purdue Research Foundation, 1989.
- [17] H. Li y T. J. Williams, A Formalization And Extension Of The Purdue Enterprise Reference Architecture And The Purdue Methodology, West Lafayette, IN: Purdue University, 1994.
- [18] International Society of Automation, ISA–95.00.01–2000. Enterprise-Control System Integration Part 1: Models and Terminology, Durham, NC: Instrument Society of America, 2000.
- [19] S. Asensio, E. Dimonte, S. Linares, I. Paredes, M. García-Menéndez, A. Rodríguez , J. Valiente y A. Flecha, «Guía de Bolsillo: Ciberseguridad en la Pirámide de Automatización Industrial,» Centro de Ciberseguridad Industrial, 2017.
- [20] N. Desai, «IT vs. OT for the Industrial Internet – Two Sides of the Same Coin?,» GlobalSign, 27 04 2016. [En línea]. Available: <https://www.globalsign.com/en/blog/it-vs-ot-industrial-internet/>. [Último acceso: 03 11 2019].
- [21] S. Reuther, «The end game of the automation pyramid,» eeNews Europe, 19 03 2019. [En línea]. Available: <https://www.eenewseurope.com/news/end-game-automation-pyramid>. [Último acceso: 03 11 2019].
- [22] C. Cassiolato, «Redes Industriales - Parte 1,» Smar Technology Company, [En línea]. Available: <http://www.smar.com/espanol/articulos-tecnicos/redes-industriales-parte-1>. [Último acceso: 03 11 2019].
- [23] Á. Zabala Basaguren, «Pirámide de la automatización e industria 4.0,» WITORG, 2019. [En línea]. Available: <https://www.witorg.org/piramide-de-la-automatizacion-e-industria-4-0/>. [Último acceso: 03 11 2019].
- [24] R. Messerschmidt, «Real-time with Ethernet,» de *Proc. 1st Int. Workshop on Real-Time LANS in the Internet Age (RTLIA 2002)*, Technical Univ. of Vienna, Austria, 2002.
- [25] W. Voss, «A Comprehensible Guide to Industrial Ethernet,» Copperhill Technologies, 2019. [En línea]. Available: <https://copperhilltech.com/a-comprehensible-guide-to-industrial-ethernet/>. [Último acceso: 28 11 2019].
- [26] J. Schwager, «Information about Real-Time Ethernet in Industry Automation,» Laboratory of Process Data Processing of Reutlingen University, 10 11 2013. [En línea]. Available: <http://www.pdv.reutlingen-university.de/rte/>. [Último acceso: 10 11 2019].

- [27] J. Beran, F. Zezulka y P. Fiedler, «Findings on QoS Metrics of L3 Network Devices Intended for Future Factory Automation,» de *9th IFAC Workshop on Programmable Devices and Embedded Systems*, Roznov pod Radhostem, Czech Republic, 2009.
- [28] A. Lüder y K. Lorentz, *IAONA Handbook Industrial Ethernet*, Magdeburg: Industrial Automation Open Networking Alliance e. V., 2005.
- [29] J. Robert, J.-P. Georges, E. Rondeau y T. Divoux, «Minimum Cycle Time Analysis of Ethernet-Based Real-Time Protocols,» *International Journal of Computers Communications & Control*, vol. 7, nº 4, pp. 744-758, 2012.
- [30] O. Kleineberg y A. Schneider, *Time-Sensitive Networking for dummies*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [31] S.-L. Jämsä-Jounela, «Future trends in process automation,» *Annual Reviews in Control*, vol. 31, pp. 211-220, 2007.
- [32] Modbus Organization, «MODBUS Application Protocol Specification V1.1b3,» 26 04 2012. [En línea]. Available: http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf. [Último acceso: 06 11 2019].
- [33] Autracen, «La batalla por... ¿Las Redes?,» 09 10 2017. [En línea]. Available: <http://www.autracen.com/la-batalla-las-redes/>. [Último acceso: 12 12 2019].
- [34] A. Jacobsen, «Industrial network market shares 2019 according to HMS,» HMS Networks, 07 05 2019. [En línea]. Available: <https://www.hms-networks.com/news-and-insights/news-from-hms/2019/05/07/industrial-network-market-shares-2019-according-to-hms>. [Último acceso: 11 12 2019].
- [35] ODVA, «The Common Industrial Protocol (CIP™),» [En línea]. Available: <https://www.odva.org/Technology-Standards/Common-Industrial-Protocol-CIP/Overview>. [Último acceso: 12 10 2019].
- [36] ODVA, «Specification Subscription & Vendor ID Order Form,» [En línea]. Available: <https://secure.odva.org/forms/spec-vendor-id-order-form.htm>. [Último acceso: 06 12 2019].
- [37] ODVA, «DeviceNet: CIP on CAN Technology,» 03 2006. [En línea]. Available: https://www.odva.org/Portals/0/Library/Publications_Numbered/PUB0002_6R4_Tech-Adv-Series-DeviceNet.pdf. [Último acceso: 29 11 2019].
- [38] T. Miller, «CAN bus: Controller Area Network Enables Vehicle Communication,» 01 09 2019. [En línea]. Available: <https://obdstation.com/can-bus/>. [Último acceso: 30 11 2019].
- [39] ODVA, «DeviceNet Cable System - Planning and Installation Manual,» 2003. [En línea]. Available: https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/global/web_dwl_technical_info/Device_net.pdf. [Último acceso: 29 11 2019].
- [40] International Organization for Standardization, *ISO 11898-2. Road vehicles - Controller area network (CAN) - Part 2: High-speed medium access unit*, Geneva, Switzerland, 2003.

- [41] ODVA, «ControlNet: CIP on CTDMA Technology,» 03 2016. [En línea]. Available: https://www.odva.org/Portals/0/Library/Publications_Numbered/PUB00200R1_Tech-Series-ControlNet.pdf. [Último acceso: 06 11 2019].
- [42] TechnologyUK, «ControlNet,» [En línea]. Available: <http://www.technologyuk.net/computing/computer-networks/industrial-networks/controlnet.shtml>. [Último acceso: 07 12 2019].
- [43] SMC Corporation, «Sistema en bus de campo compatible con CompoNet,» [En línea]. Available: http://content2.smcetech.com/pdf/EX120-121-122_ES.pdf. [Último acceso: 06 11 2019].
- [44] C. Lorenzo, «Introducción a Componet,» [En línea]. Available: <http://www.etitudela.com/entrenadorcomunicaciones/downloads/componetintroduccioncomponet.ppt>. [Último acceso: 08 12 2019].
- [45] ODVA, «CompoNet: CIP on TDMA Technology,» 03 2016. [En línea]. Available: https://www.odva.org/Portals/0/Library/Publications_Numbered/PUB00161R1_Tech-Series-CompoNet.pdf. [Último acceso: 08 12 2019].
- [46] ODVA, «EtherNet/IP: CIP on Ethernet Technology,» 03 2016. [En línea]. Available: https://www.odva.org/Portals/0/Library/Publications_Numbered/PUB00138R6_Tech-Series-EtherNetIP.pdf. [Último acceso: 06 11 2019].
- [47] F. Ogden, «Industrial Ethernet Book Issue 73 / 33 - Realtime Ethernet: EtherNet/IP,» 11 2012. [En línea]. Available: <https://iebmedia.com/index.php?id=9045&parentid=63&themeid=255&hft=73&showdetail=true&bb=1>. [Último acceso: 11 12 2019].
- [48] ODVA, «EtherNet/IP Quick Start for Vendors Handbook,» 2008. [En línea]. Available: https://www.odva.org/Portals/0/Library/Publications_Numbered/PUB00213R0_EtherNetIP_Developers_Guide.pdf. [Último acceso: 11 12 2019].
- [49] Opiron Electronics, «¿Qué es Modbus?,» [En línea]. Available: <https://www.opiron.com/2017/06/29/que-es-modbus/>. [Último acceso: 06 11 2019].
- [50] Modbus Organization, «Modbus FAQ: About The Modbus Organization,» [En línea]. Available: <http://modbus.org/faq.php>. [Último acceso: 06 11 2019].
- [51] Modbus Organization, «MODBUS/TCP Security,» 25 07 2018. [En línea]. Available: http://modbus.org/docs/MB-TCP-Security-v21_2018-07-24.pdf. [Último acceso: 13 12 2019].
- [52] Modbus Organization, «MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02,» 20 12 2006. [En línea]. Available: http://modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1_02.pdf. [Último acceso: 13 12 2019].
- [53] Telemecanique, «Modicon Modbus Plus Network Planning and Installation Guide Version 6.0,» 11 2004. [En línea]. Available:

- <http://www.bh-automation.com/Download/Resources/ModBus-Plus-Planning-And-Installation-Guide.pdf>. [Último acceso: 13 12 2019].
- [54] Modbus Organization, «Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b,» 24 10 2006. [En línea]. Available: http://modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf. [Último acceso: 13 12 2019].
- [55] Acromag, Inc., «Introduction To Modbus TCP/IP,» 2005. [En línea]. Available: https://www.prosoft-technology.com/kb/assets/intro_modbustcp.pdf. [Último acceso: 13 12 2019].
- [56] PI España, «PROFIBUS,» [En línea]. Available: <http://profibus.es/profibus>. [Último acceso: 07 11 2019].
- [57] Siemens AG, «Katalog IK PI - 2015, Kap. 3: PROFIBUS,» 2014. [En línea]. Available: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109765560/SIMATIC_NET_IKPI_chap03_PROFIBUS_English_2015.pdf. [Último acceso: 07 11 2019].
- [58] PROFIBUS Nutzerorganisation e. V., «PROFIBUS System Description - Technology and Application,» 04 2016. [En línea]. Available: <https://www.profibus.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=52380&token=4868812e468cd5e71d2a07c7b3da955b47a8e10d>. [Último acceso: 14 12 2019].
- [59] M. Felser, «PROFIBUS Manual,» 25 08 2017. [En línea]. Available: <https://www.felser.ch/profibus-manual/index.html>. [Último acceso: 14 12 2019].
- [60] R. Sekhawat, A. Muthuselvakumar, V. Upendranath, B. Asia, C. Prasad, K. Rao, K. Solomon Raju y K. Murty, «Design and Implementation of PROFIBUS Data Link Layer,» 01 1999. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/7169453/Design_and_Implementation_of_PROFIBUS_Data_Link_Layer. [Último acceso: 14 12 2019].
- [61] L. Ferreira, E. Tovar y M. Alves, «Profibus protocol extensions for enabling inter-cell mobility in bridge-based hybrid wired/wireless networks,» de *Fieldbus Systems and Their Applications*, Aveiro, Portugal, 2003.
- [62] Samon AG, «PROFIBUS-PA Technical Information. Part 4: Communications,» 12 1999. [En línea]. Available: <https://www.samsongroup.com/document/l453en.pdf>. [Último acceso: 15 12 2019].
- [63] Acromag, Inc., «Introduction to PROFIBUS DP,» 2002. [En línea]. Available: <http://www.diit.unict.it/users/scava/dispense/II/Profibus.pdf>. [Último acceso: 14 12 2019].
- [64] INCIBE, «Características y seguridad en PROFINET,» 16 02 2017. [En línea]. Available: <https://www.incibe-cert.es/blog/caracteristicas-y-seguridad-profinet>. [Último acceso: 09 11 2019].

- [65] D. Lane, «Overview and Application of PROFINET,» 28 08 2013. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/ProfibusUK/introduction-to-profinet-derek-lane>. [Último acceso: 15 12 2019].
- [66] N. Ayllon, «PROFIBUS vs PROFINET: Comparison and Migration Strategies,» 04 07 2018. [En línea]. Available: <https://www.industr.com/en/profibus-vs-profinet-comparison-and-migration-strategies-2337402>. [Último acceso: 15 12 2019].
- [67] Universidad PROFINET, «Comunicación en Tiempo Real Isócrono (IRT),» [En línea]. Available: <https://profinetuniversity.com/profinet-basico/comunicacion-en-tiempo-real-isocrono-irt/>. [Último acceso: 09 11 2019].
- [68] J. A. Cancelas Caso y J. Á. Sirgo Blanco, «Tecnologías de Control: PROFINET (Documentación de la asignatura "Regulación y Control de Máquinas Navales" de la Titulación "Licenciado en máquinas navales" de la Universidad de Oviedo),» 2013. [En línea]. Available: http://isa.uniovi.es/docencia/ra_marina/cuatrim2/Temas/11%20-%20PROFInet.pdf. [Último acceso: 15 12 2019].
- [69] EPSG, «POWERLINK - The power of connections,» [En línea]. Available: <https://www.ethernet-powerlink.org/>. [Último acceso: 10 11 2019].
- [70] IEEE Standards Association, «IEEE 61158-2017 - IEEE Standard for Industrial Hard Real-Time Communication,» 31 08 2017. [En línea]. Available: <https://standards.ieee.org/standard/61158-2017.html>. [Último acceso: 16 12 2019].
- [71] «openPOWERLINK - An Open Source POWERLINK protocol stack,» [En línea]. Available: <http://openpowerlink.sourceforge.net/>. [Último acceso: 15 12 2019].
- [72] Instituto Schneider Electric de Formación, «Manual CANOpen,» 11 11 2008. [En línea]. Available: <http://automata.cps.unizar.es/webcursoaut/ManualCANOpenv1.pdf>. [Último acceso: 15 12 2019].
- [73] CAN in Automation, «CAN Knowledge,» [En línea]. Available: <https://www.can-cia.org/can-knowledge/>. [Último acceso: 15 12 2019].
- [74] EtherCAT Technology Group, «EtherCAT - El bus de campo de Ethernet,» 05 2018. [En línea]. Available: https://www.ethercat.org/download/documents/ETG_Brochure_ES.pdf. [Último acceso: 16 12 2019].
- [75] Beckhoff, «EtherCAT G: Ultimate I/O Performance,» 11 2018. [En línea]. Available: https://download.beckhoff.com/download/Document/catalog/Beckhoff_EtherCAT_G_e.pdf. [Último acceso: 16 12 2019].
- [76] EtherCAT Technology Group, «EtherCAT to demonstrate a 12.5us cycle time (Press Release),» 23 04 2012. [En línea]. Available: https://www.ethercat.org/download/press/etg_201202_e.pdf. [Último acceso: 16 12 2019].

- [77] EtherCAT Technology Group, «EtherCAT FAQs,» [En línea]. Available: <https://www.ethercat.org/es/faq.html>. [Último acceso: 16 12 2019].
- [78] rt-labs, «Open EtherCAT Society,» [En línea]. Available: <https://github.com/OpenEtherCATsociety>. [Último acceso: 16 12 2019].
- [79] Beckhoff, «EtherCAT System Documentation,» 29 06 2018. [En línea]. Available: https://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-terminals/ethercatsystem_en.pdf. [Último acceso: 16 12 2019].
- [80] R. Zurawski, Industrial Communication Technology Handbook - 2nd Ed., Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [81] P. Lutz, «Industrial Ethernet Book Issue 21 / 30 - Ethernet motion technology: The SERCOS interface,» 07 2004. [En línea]. Available: <https://iebmedia.com/index.php?id=4525&parentid=63&themeid=255&hft=21&showdetail=true>. [Último acceso: 18 12 2019].
- [82] J. Farkas, «Introduction to IEEE 802.1 (Focus on the Time-Sensitive Networking Task Group),» 05 03 2018. [En línea]. Available: <http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2018/tsn-farkas-intro-0318-v01.pdf>.
- [83] IEEE 802, «IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee,» 06 09 2019. [En línea]. Available: <http://www.ieee802.org/>. [Último acceso: 29 12 2019].
- [84] International Organization for Standardization, «ISO Store (Searching for 8802),» [En línea]. Available: <https://www.iso.org/search.html?q=8802>. [Último acceso: 29 12 2019].
- [85] IEEE 802.1, «Welcome to the IEEE 802.1 Working Group,» [En línea]. Available: <https://1.ieee802.org/>. [Último acceso: 29 12 2019].
- [86] P. Thaler, N. Finn, D. Fedyk, J. Farkas, G. Parsons y E. Gray, «Tutorial - IEEE 802.1Q Media Access Control Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks,» 10 03 2013. [En línea]. Available: http://www.ieee802.org/802_tutorials/2013-03/8021-IETF-tutorial-final.pdf. [Último acceso: 31 12 2019].
- [87] IEEE 802.1, «IEEE 802.1Q-2018 - IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks,» 06 07 2018. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1Q-2018.html. [Último acceso: 03 01 2020].
- [88] IEEE 802.1, «802.1AS-2011 - IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks,» 30 03 2011. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1AS-2011.html. [Último acceso: 03 01 2020].
- [89] G. M. Garner, «IEEE 1588 Version 2,» 24 09 2008. [En línea]. Available: <http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2008/as-garner-1588v2-summary-0908.pdf>. [Último acceso: 03 01 2020].
- [90] J. Farkas, «IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group (TG) Overview,» 11 11 2018. [En línea]. Available:

- <http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2018/detnet-tsn-farkas-tsn-overview-1118-v01.pdf>. [Último acceso: 01 01 2020].
- [91] J. Farkas, «IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking (TSN) Update,» 21 11 2019. [En línea]. Available: <https://datatracker.ietf.org/meeting/106/materials/slides-106-detnet-sessb-tsn-update>. [Último acceso: 06 01 2020].
 - [92] IEEE 802.1, «802.1Qav-2009 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-- Virtual Bridged Local Area Networks Amendment 12: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams,» 05 01 2010. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1Qav-2009.html. [Último acceso: 03 01 2020].
 - [93] IEEE 802.1, «802.1Q-2011 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks,» 31 08 2011. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1Q-2011.html. [Último acceso: 04 01 2020].
 - [94] IEEE 802.1, «802.1Qbv-2015 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks -- Bridges and Bridged Networks - Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic,» 18 03 2016. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1Qbv-2015.html. [Último acceso: 04 01 2020].
 - [95] IEEE 802.1, «802.1Qbu-2016 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks -- Bridges and Bridged Networks -- Amendment 26: Frame Preemption,» 30 08 2016. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1Qbu-2016.html. [Último acceso: 04 01 2020].
 - [96] IEEE 802.3, «802.3br-2016 - IEEE Standard for Ethernet Amendment 5: Specification and Management Parameters for Interspersing Express Traffic,» 14 10 2016. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_3br-2016.html. [Último acceso: 05 01 2020].
 - [97] IEEE 802.3, «IEEE 802.3-2018 - IEEE Standard for Ethernet,» 14 06 2018. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_3-2018.html. [Último acceso: 05 01 2020].
 - [98] L. Winkel y M. Johas Teener, «Joint Tutorial IEEE 802.3br TF Interspersing express traffic (IET) and IEEE 802.1 Time sensitive Networking (TSN),» 03 2015. [En línea]. Available: http://grouper.ieee.org/groups/802/3/br/public/Tutorial2_Berlin/8023-IET-TF-1501-Winkel-Tutorial-20150115_r06.pdf. [Último acceso: 05 01 2020].
 - [99] IEEE 802.1, «802.1Qch-2017 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Bridges and Bridged Networks--Amendment 29: Cyclic Queuing and Forwarding,» 28 06 2017. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1Qch-2017.html. [Último acceso: 05 01 2020].

- [100] IEEE 802.1, «P802.1Qcr - IEEE Draft Standard for Local and metropolitan area networks--Bridges and Bridged Networks Amendment: Asynchronous Traffic Shaping,» [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/project/802_1Qcr.html. [Último acceso: 05 01 2020].
- [101] IEEE 802.1, «802.1Qca-2015 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-- Bridges and Bridged Networks - Amendment 24: Path Control and Reservation,» 11 03 2016. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1Qca-2015.html. [Último acceso: 04 01 2020].
- [102] IEEE 802.1, «802.1CB-2017 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Frame Replication and Elimination for Reliability,» 27 10 2017. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1CB-2017.html. [Último acceso: 06 01 2020].
- [103] «802.1Qci-2017 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Bridges and Bridged Networks--Amendment 28: Per-Stream Filtering and Policing,» 28 09 2017. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1Qci-2017.html. [Último acceso: 06 01 2020].
- [104] IEEE 802.1, «P802.1Qcz – Congestion Isolation,» [En línea]. Available: <https://1.ieee802.org/tsn/802-1qcz/>. [Último acceso: 06 01 2020].
- [105] IEEE 802.1, «802.1Qat-2010 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Virtual Bridged Local Area Networks Amendment 14: Stream Reservation Protocol (SRP),» 30 09 2010. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1Qat-2010.html. [Último acceso: 03 01 2020].
- [106] IEEE 802.1, «802.1Qcp-2018 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Bridges and Bridged Networks--Amendment 30: YANG Data Model,» 14 09 2018. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1Qcp-2018.html. [Último acceso: 06 01 2020].
- [107] Internet Engineering Task Force, «RFC 6020: YANG - A Data Modeling Language for the Network Configuration Protocol (NETCONF),» 10 2010. [En línea]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc6020>. [Último acceso: 06 01 2020].
- [108] IEEE 802.1, «IEEE 802.1BA-2011 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Audio Video Bridging (AVB) Systems,» 10 09 2011. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1BA-2011.html. [Último acceso: 01 01 2020].
- [109] IEEE 802.1, «IEEE 802.1CM-2018 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks -- Time-Sensitive Networking for Fronthaul,» 08 06 2018. [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_1CM-2018.html. [Último acceso: 01 01 2020].

- [110] IEEE 802.1, «P802.1CMde – Enhancements to Fronthaul Profiles to Support New Fronthaul Interface, Synchronization, and Syntonization Standards,» [En línea]. Available: <https://1.ieee802.org/tsn/802-1cmde/>. [Último acceso: 01 01 2020].
- [111] IEEE 802.1, «IEC/IEEE 60802 TSN Profile for Industrial Automation,» [En línea]. Available: <https://1.ieee802.org/tsn/iec-ieee-60802/>. [Último acceso: 01 01 2020].
- [112] IEEE 802.1, «P802.1DG – TSN Profile for Automotive In-Vehicle Ethernet Communications,» [En línea]. Available: <https://1.ieee802.org/tsn/802-1dg/>. [Último acceso: 01 01 2020].
- [113] IEEE 802.1, «P802.1DF – TSN Profile for Service Provider Networks,» [En línea]. Available: <https://1.ieee802.org/tsn/802-1df/>. [Último acceso: 01 01 2020].
- [114] Papeles de Inteligencia, «Qué es industria 4.0 y por qué debería importarte si produces átomos,» [En línea]. Available: <https://papelesdeinteligencia.com/que-es-industria-4-0/>. [Último acceso: 12 10 2019].
- [115] IONOS, «CSMA/CD: protocolo de transmisión anticollisiones,» 07 05 2019. [En línea]. Available: <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/csmacd/>. [Último acceso: 09 11 2019].